



行政院環境保護署

111 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置 之研發

期末報告書(定稿本)

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立臺灣大學／水工試驗所
專案主持人：游景雲 教授/主任
專案執行期間：111 年 09 月 01 日起至
112 年 08 月 31 日止

中 華 民 國 112 年 08 月 印製





111 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗 期末報告

一、專案基本資料表

申請編號： (由本署填寫)

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼		LAB-R-O-H1-C (如非實驗性質含氣溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件 1-4)		
專案類別(單選)		☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型		研究主題		☐ 整治 ☐ 調查 ☒ 政策類或其他		
申請機構系所		國立臺灣大學生農學院水工試驗所						
機構地址		台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號						
專案主持人		游景雲		職等／職稱		教授/主任		
協同主持人		林聖淇		職等／職稱		助理研究員		
專案 名稱	中文	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發						
	英文	Research and Development of Heavy Metal Flux Monitoring Device under the Saturated Soil Infiltration in Paddy Field						
	關鍵字	土壤飽和入滲(Saturated Soil Infiltration)、重金屬(Heavy Metal)、監測裝置(Monitoring Device)、水田(Paddy Field)						
執行期程		自民國 111 年 09 月 01 日起至民國 112 年 08 月 31 日止						
專案主持人		姓名：游景雲		E-mail：linsc0329@gmail.com		專線：02-33662603 手機：0937087673		
專/兼任人員		姓名：張志沛		E-mail：ccp630@ntu.edu.tw		專線：02-33662641 手機：		
經費 分 析 總 表 (僅模場試驗專 案需填寫兩年 度金額)	專 案 預 估 總 經 費		第一年 申請經費		第二年 申請經費		編列說明	
	1.	人事費用	242,007				(1~6 項相加之 50%為限)	
	2.	設備使用含維護費	0				(與計畫實驗相關)	
	3.	耗材與主要費用	496,393				(與計畫主體相關)	
	4.	其它研究相關費用	0				(含差旅與租賃費用)	
	5.	雜項費用	26,600				(1~6 項相加之 5%為限)	
	6.	行政管理費	85,000				(1~6 項相加之 10%為限)	
	7.	自籌款					(申請單位自行籌備款項)	
	申請補助經費(1~6 項)		850,000				總金額：850,000	
計畫總經費(1~7 項)		850,000				總金額：850,000		

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

111 年度專案成果績效自評表

二、成果績效自評表：「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學術產 出及活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	1	0	0	1	
		(2)研討會論文	1	0	1		智慧污染監測系 統裝置應用於水 田土壤重金屬污 染之預警(農工 研討會/2023)
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文					
		(2)國際研討會論 文發表					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術						
	(2)技術平台						
B 人才 培育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	1	1		兼任培訓
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中心					
(4)形成實驗室		1	1	1			
9.其他指標 (請自行命名)		「智慧污染監測 系統裝置」之專 家諮詢會議	1	0	1		



(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申請中	發明	0	0	0		
			新型/設計	1	0	0	1	智慧土壤重金屬污染監測系統裝置
			合計	1	0	0	1	
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數						
		授權金(仟元)						
		衍 生 利 益 金 (仟元)						
	3.技術移轉 (專利)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金 (仟元)						
	4.技術移轉 (應用技術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍 生 利 益 金 (仟元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系 (件數)						
	C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數					
金額(仟元)								
7.促成投資		件數						
		投資金額 (仟元)						
8.促成取得 業界科專		件數						
		業界投資金額 (仟元)						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(三) 政策面

目標達成程度			申請預估數	期中達成數	期末達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
項目							
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)						
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200字為限)

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明) 1.投稿國內農工、水利或環工相關研討會 1 篇；投稿國內農工學報、台灣水利或其他同等級期刊 1 篇 2.培訓水田重金屬污染預警系統的專(兼)任碩士級研究助理 1 名。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明) 1.申請新型發明專利 1 件。 2.配合現地條件研發水田重金屬污染監測裝置與預警系統標準作業程序，積極與業界分享研究成果且評估本技術能量商業化之契機。
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污場址管理等政策及法規研訂之參考) 1.本預警監測系統機制符合環保署保護整治完成受污染農地免受重金屬威脅的政策。 2.透過持續性的科學監測數據與評估水田在灌溉過程中監測裝置的重金屬濃度變化趨勢，進一步提供政府相關業務單位作為保護水田免受重金屬污染的預警監測方法。



一、主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」、「兼任人員」及「臨時工」等類別之順序分別填寫

姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	執行期間
游景雲	台大水工所	專案主持人	計畫整體性督導、研究成果綜合研析、評估預警系統之可行性與適用性。	2023/01/01~ 2023/08/31
林聖淇	台大水工所	協同主持人	計畫研究成果綜合撰寫、資料分析討論、預警系統之可行性與適用性探討。	2022/09/01~ 2023/08/31
莊繹叡	台大農化系	碩士生	實驗室 XRF 操作、現地監測放樣與回收、樣本前處理。	2022/09/01~ 2023/08/31
莊子醇	台藝大	臨時工	實驗室整潔維護、現地監測樣本放樣與回收、樣本前處理。	2022/09/01~ 2023/08/31
	以下空白			

二、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

投入資源類別	數量	說明
1.自籌款	0 元	無
2.人力	0 人月	無
3.設備	無	無
4.其他資源 (請自行增列)	無	無



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒構想書 ☐期中報告 審查意見回覆對照表
☐修正計畫書 ☐期末報告

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他	主持人：林聖淇 NO：D12	
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1.具可行性。 2.現場測試變數掌握宜完整規劃評估。		1.感謝委員肯定。 2.感謝委員意見，於計畫申請書敘明農地測試變數與現地規劃評估細節。	
委員二 1.農地選擇是本案執行的一項挑戰。		1.感謝委員肯定。	
委員三 1.本研究擬結合樹脂包與入滲實驗，建立量測水田重金屬入滲率的方法。研究具有應用性。 2.建議比較直接量測農地土壤(也具有類似離子交換及吸附重金屬能力)與應用樹脂法之差異性。		1.感謝委員肯定。 2.感謝委員意見，將以手持式 XRF 檢測農地土壤的重金屬濃度，作為與應用樹脂法之差異性比對。	
委員四 1.有關該計畫之專案新穎性，本計畫透過水田土壤飽和入滲重金屬通量智慧污染監測裝置，提供土壤及地下水重金屬污染預警機制，有助於降低我國人民受污染之危害。		1.感謝委員肯定。	
委員五 1.研究主題符合土壤及地下水污染整治基金補助精神、探討課題實際、整體研究架構明確方法可行、技術未來應用及推廣性應加強。		1.感謝委員意見與肯定，於計畫申請書增列敘明本研發技術未來的應用及推廣的內容。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒構想書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他	主持人：林聖淇	NO：D12
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員六 1.請補充說明本計畫監測裝置(如樹脂裝置)之穩定性測試,以及品保品管測試及要求。 2.本計畫擬辦理推廣及專家諮詢會議之實質效益為何?		1.感謝委員意見,於研究方法及步驟中增列敘明監測裝置之穩定性測試,以及品保品管測試及要求。 2.感謝委員意見,透過相關會議了解現地試驗遭遇之問題與困難,作為撰寫水田重金屬污染監測裝置與預警系統標準作業程序之操考依據。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐期中報告
☒修正計畫書 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他	主持人：林聖淇 NO：D12	
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
承辦單位 1.經審閱階段成果報告已依申請計畫書定稿本執行，符合預期執行進度。		1.感謝承辦單位肯定。	
以下空白			



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒期中報告 審查意見回覆對照表
☐修正計畫書 ☐期末報告

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他	主持人：林聖淇 NO：D12	
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 本計畫研發出水田土壤飽和入滲重金屬通量智慧污染監測裝置，透過一年兩次之監測數據資料，並以水田根部土壤飽和溶液作為最終之評估結果，得以有效克服各項不利因素，可有效瞭解灌溉水質對於農地土壤之影響趨勢，並有助於減少我國農地受重金屬污染之可能性。 2. 本計畫為量測及分析樣品中之元素濃度估值，採用 X 射線螢光光譜儀進行檢測，然其本身具有放射性及輻射危害，操作人員是否具有操作資格認證，建議宜補充其相關認證資料，以利相關單位進行參考。 3. 本計畫採用陰陽離子交換樹脂技術進行水體污染溯源監測作業，建議宜補充各監測點位之座標及對應背景資訊等，並提供所監測出之各項量化數據，以供相關單位進行評估。 4. 本計畫研發智慧污染監測裝置，用以評估水田栽種其間受重金屬污染之風險，以作為保護農地生產安全之預防方法，具實場應用性。		1. 感謝委員肯定，本計畫因中部地區水稻田插秧時間延遲，原定 2 次監測數據資料改為 1 次(1 期作)，增加監測水田坵塊，以符合計畫規劃數量，詳見 4.4 節。 2. 感謝委員意見，已於期末報告書中增列操作 X 射線螢光光譜儀之人員相關認證資料，詳見 4.6 節。 3. 感謝委員意見，已於期末報告書中將各監測農地點位之座標及對應背景資訊等，詳見 4.4 節。 4. 感謝委員肯定。	
委員二			
1. 以樹脂縮時紀錄膠囊較能取得長時間採樣代表性特徵。建議評估水田環境中不同金屬離子雜質的吸附對於所欲偵測物質(例如銅)的影響。 2. 「智慧污染監測系統裝置」監測的準確性取決於 XRF 的偵測極限與離子種類。建議在建立標準時須考慮陰、陽離子樹脂可對不同重金屬與不同工廠之影響。		1. 感謝委員意見，水田土壤環境複雜，例如浸水與曬田交替，導致土壤氧化還原電位改變，都會影響監測結果，詳見 5.3 節。 2. 感謝委員意見，在現地監測實務中發現工廠對於廢水處理的技術與方法會影響陰、陽離子樹脂吸附重金屬訊號的差異。因此，經由長期監測所累積的數據資料可強化或判斷樹脂對不同重金屬與不同工廠污染的證據，詳見 5.4 節。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒期中報告 審查意見回覆對照表
☐修正計畫書 ☐期末報告

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他		主持人：林聖淇 NO：D12
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員二			
3. 建議評估水田環境中其他非金屬離子對於樹脂吸附的影響(空白實驗)。		3. 感謝委員意見，受限於建置檢量線以金屬為主，非金屬的討論有其難度。	
4. 圖 5-1~圖 5-20 分析鈣與鋇、銅與鋇、鋅與鋇以及鉻與鋇的濃度線性關係。建議補充說明考量鋇的目的。		4. 感謝委員意見，已於期末報告中增列說明討論鋇的目的，詳見 5.1 節。	
5. 承上，請補充說明金屬離子濃度設定為 0.045-0.727mg/L 的依據。		5. 感謝委員意見，已於期末報告中增列金屬離子濃度設定的依據，詳見 4.5 節。	
6. 建議評估 pH 對於金屬離子對於樹脂吸附的影響。		6. 感謝委員意見，已於期末報告中增列 pH 對樹脂吸附的影響，詳見 4.5 節。	
委員三			
1. 文獻收集具體詳細。實驗流程方法及執行進度與預定進度查核相符。成果說明討論清晰，於實際農地測試，成果具實場運用性。		1. 感謝委員肯定。	
委員四			
1. 建議可說明「智慧污染監測系統裝置」之稱為「智慧」的理由何在？		1. 感謝委員意見，已於期末報告中增列說明，詳見 4.1 節與 4.4 節。	
2. 入滲重金屬通量之監測除了累積之重金屬量之外，入滲流量的累積體積也應該同時被量測出來，否則就不能稱為「通量」，然而入滲量測的難度高於重金屬重量的量測，此部分為此研發項目能夠可行之關鍵因素，建議宜把重點放在此處。		2. 感謝委員意見，本計畫的入滲「通量」概念是以水田浸水狀態下，假設土壤水飽和時入滲的一維垂直流向的特性，並不是去評估真正入滲通量大小(同意委員意見，難度高)，為能夠了解監測期間的金屬濃度是否異常，會以鋇金屬當作背景濃度，再以(目標重金屬/鋇)的比值作為監測依據，詳見 5.3 節。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒期中報告 審查意見回覆對照表
☐修正計畫書 ☐期末報告

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他	主持人：林聖淇 NO：D12	
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員四 3. 樹脂離子交換(吸附)水中各種重金屬之能力和土壤吸附各種重金屬之能力及強弱，存在一定的差異，建議提出在使用這個污染監測系統裝置，針對各種重金屬是否存在適用性，當然也要考量 XRF 檢測各種重金屬的能力差異。 4. 實驗室高濃度金屬滲漏試驗之 pH 是否有作控制?是維持在多少?請說明。		3. 感謝委員意見，針對不同重金屬在飽和土壤水的型態也會有差異，陰、陽離子樹脂的監測就是針對水環境中帶正、負電的金屬離子而設計；亦增列 XRF 對金屬的偵測極限值，詳見 5.3 節與 4.6 節。 4. 感謝委員意見，實驗室試驗對 pH 值並無控制，以標準溶液配置滲漏液後，pH 值為 1.0 左右，詳見 4.5 節。	
委員五 1. XRF 對於部分重金屬(例如鎘)之靈敏度低，未來將如何改善? 2. 重金屬濃度 0.045mg/L 之圖其 X、Y 軸與另兩濃度不同，請一致化。P.59-63Y 軸單位有誤。 3. 銅鋅鉻鎳為彰化常見之重金屬，而目前之結果可知，鉻之相關性會因濃度之增加而下降，未來之應用上是否會受到影響?		1. 感謝委員意見，針對特定金屬(如鎘)可採用專一性樹脂替代，缺點是費用高。 2. 感謝委員意見，已於期末報告書修正，詳見 5.2 節。 3. 感謝委員意見，試驗室中金屬濃度的檢量線範圍(18.6~7,518 mg/kg)都遠高於現地所監測的濃度，鉻在現地監測濃度都低於 50 mg/kg，詳見 5.2 節。	
委員六 1. 請依徵求書附件 12 格式補充主要研究人力、產業界資源投入表。		1. 感謝委員意見，已於期末報告書增列補充補充主要研究人力、產業界資源投入等資料，詳見基本資料表附件 12-4。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他		主持人：林聖淇 NO：D12
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 有關成果績效自評表，表內提出學術產出及活動須投稿論文及研討會論文各一篇，然其國內投稿論文未標示達成情形，建議確認修正之。		1. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)中修正。	
2. 本計畫文獻探討 Sorbisense 技術提供具有成本效益的被動採樣方法，可替代傳統抓樣的補充或潛在方法，其原理可精確地測量樣品體積和溶質質量濃度，且容易取出藥筒，並送至實驗室進行分析，然其設備缺點是收集樣本時間過短，受限示踪劑的容量，建議宜比較其方法與本研究差異，以探討本計畫市場競爭性。		2. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)5.5 節中增列兩種技術優劣比較一覽表。	
3. 本計畫「智慧污染監測系統裝置」採樣器之填充基材為離子交換樹脂，該材料一般呈現多孔狀或顆粒狀，依其交換能力特徵可分為強(弱)酸型陽離子交換樹脂、強(弱)鹼型陰離子交換樹脂與螯合樹脂等五種。然本計畫依其監測目標的重金屬污染源種類選擇強酸氫型陽離子交換樹脂與強鹼氫氧型陰離子交換樹脂，建議宜說明選擇以上兩種離子交換樹脂之原因，以及比較其他離子交換樹脂差異，探討不同材料對研究之影響。		3. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)4.4 節中增列說明採用強酸氫型陽離子交換樹脂與強鹼氫氧型陰離子交換樹脂之原因。	
4. 研究內容與計畫目的尚且符合。根據研究內容所提出之討論與建議尚具體可行。		4. 感謝委員肯定。	
5. 綜上所述，整體研究成果尚符合預期成果，建議仍需加強績效自評學術產出之國內外投稿績效。		5. 感謝委員肯定，後續將整理計畫內容數據資料後，投稿國內外期刊，符合相關績效要求。	
6. 本計畫藉由研發適合水田飽和土壤入滲重金屬通量之智慧污染監測裝置，評估水田栽種期間受到重金屬隨灌溉水進入農地的風險，以預防農地受重金屬污染的預警機制，未來推廣至有重金屬污染潛勢的區域，作為保護農地生產安全的方法，並期望未來實務操作方面能與農民合作，共同達成土地重金屬污染預防機制。		6. 感謝委員的建議與肯定。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他	主持人：林聖淇 NO：D12	
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員二 1. 本研究的計畫目標係研發適合水田飽和土壤入滲重金屬通量之智慧污染監測裝置。 2. 本案擬評估水田栽種期間受到重金屬隨灌溉水進入農地的風險，作為預防農地受重金屬污染的預警機制，建議補充預警的範圍及對應的防範措施。 3. 建議補充滲漏通量的定義與計算方式。滲漏通量是否指 breakthrough curve 所決定。 4. 建議探討重金屬與樹脂的等溫吸附實驗，以進一步釐清吸附量與滲透通量的關聯性。 5. 建議補充各個滲漏實驗中，金屬離子濃度設定的依據。 6. 建議補充 pH 對樹脂吸附的影響的實驗數據。 7. 滲漏實驗中對於鎘與鉛重金屬的測定，報告指出是因為土壤飽和水中的濃度太低無法呈現出來。建議補充說明，如果土壤飽和水中的鎘與鉛重金屬濃度足夠高時，對於實驗數據的影響。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)5.5 節中增列說明預警的範圍及對應的防範措施。 3. 感謝委員意見，本研發技術前提是樹脂在監測期間不能達到飽和狀態，。 4. 感謝委員意見，相關等溫吸附實驗與吸附量牽涉更複雜的試驗設計，未來會納入研究方向。 5. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)4.5 節中增列說明。 6. 感謝委員意見，本研發使用之陰、陽離子樹脂的 pH 值操作條件為 0-14 之間。 7. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)5.1 節中增列說明土壤飽和水中的鎘與鉛重金屬濃度足夠高時，對於實驗數據的影響。	
委員三 根據台灣農地重金屬污染案例，農地重金屬往往是因灌溉水含有微量重金屬，吸附於土壤，經一定時間濃度累積上升。此問題若能早期發現，就能降低農地土壤重金屬累積。本研究發展由樹脂吸附一定量田間入滲水，濃縮使樹脂膠囊重金屬濃度上升，佐以 XRF 現場測定，期能作為農地土壤受重金屬威脅的預警機制的工具之一。		感謝委員的意見。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他		主持人：林聖淇 NO：D12
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員三			
1. 期末報告成果著重在入滲通量-樹脂累積量-XRF 測定相關資訊之建立，但土水法是以土壤重金屬全量為管制指標，入滲水或是樹脂累積重金屬測值仍需轉化成土壤值，方比較能對應法規。 2. 作為預警，樹脂埋置地點宜在灌溉水入口而非田間，如同結果顯示重金屬鎘跟鎳在低濃度滲漏試驗中的樹脂吸附濃度全部低於偵測極限，而重金屬鉛的滲漏體積大於 6L 才能檢測出，因為重金屬被土壤吸附不易在土壤中移動性較。此意謂可能樹脂膠囊測定值為正常，但實際土壤重金屬污染已經產生。 3. 若只是以樹脂膠囊配合 XRF 分析，比較像是開發一被動式現場快篩檢測技術，尚不具有預測及輔助決策之智慧功能。		1. 感謝委員意見，相關見解也是本研究團隊未來研發的目標，透過大數據累積監測資訊作為對應預警機制建立之基礎。 2. 同意委員意見，本監測裝置的研發希冀能夠透過長期監測的大數據累積資料作為農地重金屬污染的預警方法，實務上，農地重金屬污染不會是單一重金屬造成，可以透過其他重金屬濃度的異常變化，判定灌溉水是否受到重金屬污染的威脅。 3. 感謝委員意見，本研發除了樹脂濃度分析外，輔以智慧機器學習技術將後端大數據處理與資訊整合才是智能關鍵。	
委員四			
1. 低滲漏量下載距偏移，並不影響預測之能力，但斜率在不同滲漏量之差異也請列入考量，及不同滲漏量下之預測是否一致?另圖 5-21(b)之數據為兩群，r²高不代表結果如預期。 2. 圖 5-21(a)~(d)鋅*0.1~*20 是什麼意思?報告中有許多誤植，例如 P.45:刪除圖 5-1、P.26 圖 7-5、P.33 輕型等。XRF 篩測值中，許多 Cd 濃度為 0，請修正。有效數字位數請統一(圖 5-1~5-32)。不同滲漏量下之結果，其 X 軸與 Y 軸所放之標題並不一致，有些會相反，請修正。 3. 請加入氫型及氫氧型離子交換樹脂之成本評估，其厚度為何?		1. 感謝委員意見，實驗室滲漏量結果說明不同濃度重金屬的水體在不同滲漏量的條件下，有其線性相關的趨勢是一致的。同意委員對圖 5-21(b)的意見，只有兩點在做線性相關分析，已於期末報告(定稿本)5.2 節中增列說明。 2. 感謝委員意見，已分別於期末報告(定稿本)4.5 節與 5.2 節中修正完畢。 3. 感謝委員意見，「智慧污染監測系統裝置」1 個的成本為 1,025 元(含 XRF 檢測)，其厚度介於 3-5 公分。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他		主持人：林聖淇 NO：D12
計畫名稱	水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發		
審查意見		執行單位回覆	
委員五			
1. 智慧污染監測系統裝置實驗設計與驗證相當縝密。		1. 感謝委員肯定。	
2. 章節 4.4 第一段第二行圖 7-5 應為圖 4-6，請更正。		2. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)修正。	
3. 智慧污染監測系統裝置之「監測器的系統」架構，完整性可再加強，建議補充說明之。		3. 感謝委員意見，已於期末報告(定稿本)4.4 節中增列說明。	
4. 智慧污染監測系統之開發，建議可初步探討物聯網架構設計，包括：數據通訊、數值可視化呈現方式等。		4. 感謝委員意見，本研究團隊後續將研發成果商品化的過程中會將相關概念納入討論。	
委員六			
1. 建議說明啟動預警機制的樹脂 XRF 篩測值閾值及預估土壤重金屬濃度可達管制標準的預估年限。		1. 感謝委員意見，啟動預警機制的閾值與預估年限需要更多監測數據才進行評估，已於期末報告(定稿本)5.5 節中增列說明原由。	
2. 農地土壤調查主要是採集表土 15 公分，本計畫是將樹脂埋設於土壤下方深度 30 公分處，考量為何？		2. 感謝委員意見，埋設深度考量有二，一是不影響農民田間操作行為，二是深度 30 公分處接近牛踏層，滲漏水流向可視為一維垂直方向。	
3. 農地土壤篩測分析重金屬濃度與樹脂篩測濃度，似有不一致的情形，例如樹脂中銅、鉻及鉛的濃度皆低於土壤濃度，但鎳及鋅的濃度皆高於土壤濃度，建議說明如何解讀解釋數據。		3. 感謝委員意見，樹脂吸附之重金屬濃度值與滲漏水通量、土壤重金屬濃度和溶解態重金屬濃度(如厭氧條件下重金屬固液相的比例)有關，本研究針對表土(0-15 cm)進行採樣，監測裝置埋設深度為 30 cm，兩者位置不同土壤重金屬濃度的差異性也會影響。	





摘要

預防農地受污染的操作實務面將遭遇許多困難與挑戰，座落於台灣農地的工廠依然林立，對於農田污染的威脅並沒有消失，隨著灌溉水進入農地的重金屬污染增量長期以來缺少一種有效的方法進行評估。面對廣大的農地與預防農地受污染機制資源有限的條件下，建置一個長期監測系統且符合經濟效益的可行預警機制是環保署未來對保護農地免受重金屬污染的重大挑戰。

本研究團隊的計畫目標係研發適合水田飽和土壤入滲重金屬通量之智慧污染監測裝置，用以評估水田栽種期間受到重金屬隨灌溉水進入農地的風險，作為預防農地受重金屬污染的預警機制，將來推廣至有重金屬污染潛勢的區域，作為保護農地生產安全的方法。本研究計畫以離子交換樹脂為基材已研發出「智慧污染監測系統裝置」，利用樹脂離子交換水中重金屬之快速及強大能力，將該採樣器埋設於定點即可紀錄自埋設監測至回收這段時間內水田入滲之重金屬通量變化。在實驗室樹脂滲漏計吸附重金屬實驗中，根據數據分析結果說明如下：

- (1) 實驗室高濃度金屬滲漏試驗中，由金屬檢測數據資料中顯示，透過統計的相關係數分析得知，11 種金屬的濃度相關係數皆達 0.95 以上，說明選用適合的離子交換樹脂(氫型)可以有效地得知滲漏水中水體通量變化趨勢的影響。
- (2) 分析鈣與鋁、銅與鋁、鋅與鋁以及鉻與鋁的濃度線性關係中，隨著滲漏水體的濃度增加，發現鈣與鋁以及銅與鋁的濃度線性關係較不受低滲漏量的影響；其餘二種本研究案關心的重金屬(鋅與鉻)因低滲漏量(例如 4 L 滲漏量)，使得線性截距值偏大而無法通過原點的現象發生。
- (3) 實驗室金屬滲漏試驗中，銅與鋁在相同滲漏量的條件下(以 8 L 滲漏量為例)，不同濃度(0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L)所對應的線性關係高(達 $R^2=0.9966$)，說明氫型離子交換樹脂可以有效地得知滲漏水中金屬濃度變化的趨勢。
- (4) 填充交換樹脂的裝置選用需有良好通透性以及材質本身不能含有重金屬之要求，選用食用級之耐酸鹼 PVC 材質等級做為扁形圓盤採樣器之外觀設計。
- (5) 水田「智慧污染監測系統裝置」所蒐集的資料顯示水田坵塊在空間上的入滲量也是不均勻的，大部分以入水口(A)與中間點(B)的位置入滲量最大。值得注意的是，本計畫所監測的 4 個農地坵塊中，平均入滲量變化差異可以達到 1 倍以上。



Abstract

- (6) 水田土壤飽和水中陽離子交換樹脂(氫型)的吸附主要是以鎳、銅與鋅為主，陰離子交換樹脂(氫氧型)則是發現有鉻的蹤跡，其餘鎘、鉛則是無訊號產生(低於檢測極限)。顯示在水田厭氧條件下，鎳、銅與鋅主要還是因帶正電而被陽離子交換樹脂(氫型)吸附，而鉻則是以帶負電的型態被陰離子交換樹脂(氫氧型)吸附，鎘與鉛則是因為土壤飽和水中的濃度太低無法呈現出來。

本研究設計主軸為「著重預警機制的可靠性與穩定性，讓土地不再被污染，重點更在於創新」。研發適合水田飽和土壤入滲重金屬通量之智慧污染監測裝置，用以評估水田栽種期間受到重金屬隨灌溉水進入農地的風險，建置水田飽和土壤重金屬入滲通量的評估方式，作為預防農地受重金屬污染的預警機制。



Abstract

The practice of preventing farmland pollution will encounter many difficulties and challenges. There are still many factories located in Taiwan's farmland, and the threat of farmland pollution has not disappeared. The increase in heavy metal pollution as irrigation water enters farmland has long lacked an effective method. method to evaluate. Facing the vast farmland and the limited resources of the farmland pollution prevention mechanism, building a long-term monitoring system and a feasible early warning mechanism with economic benefits is a major challenge for the Environmental Protection Agency to protect farmland from heavy metal pollution in the future.

The project goal of this research team is to develop a smart pollution monitoring device suitable for the infiltration of heavy metals in saturated soil in paddy fields, to assess the risk of heavy metals entering the farmland with irrigation water during paddy field planting, as an early warning mechanism to prevent heavy metal pollution in farmland, In the future, it will be extended to areas with heavy metal pollution potential as a method to protect the safety of agricultural production. This research project has developed a "smart pollution monitoring system device" using ion exchange resin as the base material. Using the fast and powerful ability of resin ion exchange for heavy metals in water, the sampler can be buried at a fixed point to record from the buried monitoring to the recovery. Changes of heavy metal flux in paddy field infiltration over a period of time. In the laboratory resin osmometer adsorption heavy metal experiment, according to the data analysis results are explained as follows:

- (1) In the high-concentration metal leakage test in the laboratory, the metal detection data shows that through statistical correlation coefficient analysis, the concentration correlation coefficients of 11 metals are all above 0.95, indicating that the appropriate ion exchange resin (Hydrogen type) can effectively understand the influence of the change trend of water flux in seepage water.



Abstract

- (2) Analyzing the linear relationship between the concentrations of calcium and strontium, copper and strontium, zinc and strontium, and chromium and strontium, as the concentration of the seepage water body increases, it is found that the linear relationship between the concentration of calcium and strontium and copper and strontium is not affected by hypotonicity.
- (3) In the laboratory metal leakage test, under the same leakage amount of copper and strontium (taking 8 L leakage as an example), different concentrations (0.045 mg/L, 0.091 mg/L, 0.182 mg/L The linear relationship corresponding to 0.727 mg/L) is high (up to $R^2=0.9966$), indicating that the hydrogen-type ion exchange resin can effectively learn the trend of metal concentration changes in seepage water.
- (4) The device filled with exchange resin must have good permeability and the material itself must not contain heavy metals. Food-grade acid and alkali-resistant PVC material grades are selected as the appearance design of the flat disc sampler.
- (5) The data collected by the "Smart Pollution Monitoring System Device" of paddy fields shows that the infiltration of paddy field mounds is also uneven in space, and most of the infiltration is the largest at the water inlet (A) and the middle point (B). It is worth noting that among the four agricultural land mounds monitored by this project, the difference in average infiltration can reach more than 1 times.
- (6) The adsorption of cation exchange resin (hydrogen type) in the saturated water of paddy field soil is mainly nickel, copper and zinc, and anion exchange resin (hydrogen oxygen type) is found to have traces of chromium, and the remaining cadmium and lead have no signal (below the detection limit). It shows that under anaerobic conditions in paddy fields, nickel, copper, and zinc are mainly adsorbed by cation exchange resins (hydrogen type) due to positive charges, while chromium is adsorbed by anion exchange resins (hydrogen-oxygen type) in a negatively charged state. , cadmium and lead cannot be shown because the concentration in soil saturated water is too low.



中文摘要

The design axis of this study is "focusing on the reliability and stability of the early warning mechanism, so that the land will no longer be polluted, and the focus is on innovation." Develop a smart pollution monitoring device suitable for the infiltration of heavy metals in saturated soil in paddy fields to assess the risk of heavy metals entering the farmland with irrigation water during the planting of paddy fields Early warning mechanism of heavy metal pollution.



目次

一、前言.....	1
二、研究目的.....	3
三、文獻探討.....	4
3.1 背景說明.....	4
3.2 離子交換樹脂與應用.....	8
四、研究方法與過程.....	18
4.1 研究架構.....	18
4.2 研究區域.....	20
4.3 研究方法.....	23
4.4 「智慧污染監測系統裝置」研發.....	26
4.5 實驗室設計.....	30
4.6 實驗室分析與 QA/QC.....	36
4.7 工作進度甘特圖.....	42
五、結果與討論.....	44
5.1 「智慧污染監測系統裝置」滲漏實驗.....	44
5.2 樹脂的重金屬濃度與 XRF 之關係.....	61
5.3 「智慧污染監測系統裝置」現地試驗.....	70
5.4 專家諮詢會議.....	84
5.5 水田重金屬污染預警系統標準作業程序.....	86
5.6 結果與討論.....	87
5.7 建議事項.....	89
六、參考文獻.....	90

附件一 「智慧污染監測系統裝置」專家諮詢會議會議紀錄



重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發



圖次

圖3-1	(a)Sorbisense™安裝示意圖 (b) Sorbisense™各種類型之吸附管配件.....	7
圖3-2	離子交換樹脂交換反應平衡示意圖.....	8
圖3-3	陰離子交換樹脂.....	10
圖3-4	陽離子交換樹脂.....	10
圖3-5	鹿港鎮鹿雅段 0246-0000 地號農地樹脂包試驗結果.....	13
圖3-6	高雄市阿公店溪環境特徵指紋樹脂包試驗結果位置分布圖.....	14
圖3-7	阿公店溪流域樹脂包鈣與鋁檢測分析累積次數分布圖.....	15
圖3-8	高雄市阿公店溪環境特徵指紋 PCA 統計分析圖.....	15
圖3-9	樹林潭底溝樹脂包污染溯源分組與監測點位關係位置分佈圖.....	16
圖3-10	樹林潭底溝第I期重金屬銅濃度與 Cu/Ca 關係圖.....	17
圖4-1	實驗室試驗研究流程圖.....	19
圖4-2	現地試驗研究流程圖.....	19
圖4-3	彰化縣東西二、三圳灌排分布圖.....	21
圖4-4	本研究專案試驗流程圖.....	23
圖4-5	手持式 X-射線螢光光譜儀(XRF)	24
圖4-6	智慧污染監測構想設計示意圖	26
圖4-7	水田監測裝置埋設空間分佈示意圖	27
圖4-8	水田監測裝置埋設空間分佈圖(以大雅段 716 地號為例)	28
圖4-9	陽離子交換樹脂反應示意圖.....	30
圖4-10	陰離子交換樹脂反應示意圖.....	30
圖4-11	氫型陽離子交換樹脂外觀.....	31
圖4-12	氫氧型陰離子交換樹脂外觀.....	32
圖4-13	實驗室滲漏計示意圖.....	34
圖4-14	實驗室滲漏試驗現況圖.....	34
圖4-15	X-射線螢光光譜儀測定原理.....	36
圖4-16	輻射操作人員結訓證書.....	41



圖次

圖5-1	重金屬鈣與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	47
圖5-2	重金屬銅與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	47
圖5-3	重金屬鋅與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	48
圖5-4	重金屬鉻與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	48
圖5-5	重金屬鈣與鋇(滲漏體積 4 L)滲漏實驗關係圖.....	48
圖5-6	重金屬鈣與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	51
圖5-7	重金屬銅與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	51
圖5-8	重金屬鋅與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	52
圖5-9	重金屬鉻與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	52
圖5-10	重金屬鈣與鋇(滲漏體積 6L)滲漏實驗關係圖.....	52
圖5-11	重金屬鈣與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	55
圖5-12	重金屬銅與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	55
圖5-13	重金屬鋅與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	56
圖5-14	重金屬鉻與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	56
圖5-15	重金屬鈣與鋇(滲漏體積 8L)滲漏實驗關係圖.....	56
圖5-16	重金屬鈣與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	59
圖5-17	重金屬銅與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	59
圖5-18	重金屬鋅與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	60
圖5-19	重金屬鉻與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖.....	60
圖5-20	重金屬銅與鋇(滲漏體積 8L)滲漏實驗關係圖.....	60
圖 5-21(a)	微量鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據.....	61
圖 5-21(b)	微量鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據.....	62
圖 5-21(c)	微量鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據.....	62
圖 5-21(d)	微量鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據.....	63
圖 5-22	含鋅的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據關係圖.....	65
圖 5-23	含鋅的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)....	65
圖 5-24	含銅的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)....	66
圖 5-25	含鉻的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)....	66



圖次

圖 5-26	含鉛的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底).....	67
圖 5-27	含鎳的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底).....	67
圖 5-28	含鈣的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底).....	68
圖 5-29	含錳的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底).....	68
圖 5-30	含鈦的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底).....	69
圖 5-31	試驗農地鹿港鎮鹿雅段 221 地號監測位置圖.....	71
圖 5-32	試驗農地(鹿雅段與大雅段)監測樹脂鈣與鋁濃度關係圖.....	72
圖 5-33	試驗農地鹿港鎮鹿雅段 246 地號監測位置圖.....	75
圖 5-34	試驗農地和美鎮大雅段 527 地號監測位置圖.....	78
圖 5-35	試驗農地和美鎮大雅段 657 地號監測位置圖.....	81
圖 5-36	「智慧污染監測系統裝置」專家諮詢會議.....	85
圖 5-37	水田重金屬污染預警系統標準作業程序流程圖.....	86



重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發



表次

表3-1	DGT 實際採樣的適用環境條件和金屬物種.....	6
表3-2	被動式採樣的優、缺點比較.....	6
表3-3	高雄市阿公店溪環境特徵指紋(Zn/Ca 與 Mn/Ca)比值一覽表.....	15
表4-1	彰化農田水利會灌溉系統所屬圳路灌溉面積與用水量.....	20
表4-2	彰化農田水利會灌溉系統與圳路.....	22
表4-3	農地汙染採樣器離子交換樹脂與土壤檢測數量一覽表.....	27
表4-4	氫型陽離子交換樹脂之基本性質.....	31
表4-5	氫氧型陰離子交換樹脂之基本性質.....	32
表4-6	滲漏計汙染採樣器離子交換樹脂與介質(砂粒)檢測數量一覽表.....	34
表4-7	灌溉水質基準值之管制項目.....	35
表4-8	XRF 空白樹脂標準品做單點不移動檢測結果.....	38
表4-9	XRF 濃度 2.0(mg/kg)標準樹脂重複地拿取、均勻擾動檢測結果...	38
表4-10	XRF 濃度 5.0(mg/kg)標準樹脂重複地拿取、均勻擾動檢測結果...	38
表4-11	實驗分析儀器.....	40
表4-12	實驗藥品一覽表.....	40
表4-13	手持式 XRF(OLYMPUS Vanta)離子交換樹脂重金屬濃度檢測極限一覽表....	41
表4-14	工作進度甘特圖.....	42
表4-15	本專案核心技術之技術成熟度等級一覽表.....	43
表5-1	「智慧汙染監測系統裝置」金屬濃度(0.045 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表...	46
表5-2	「智慧汙染監測系統裝置」重金屬(0.045 mg/L)滲漏實驗相關係數一覽表.....	47
表5-3	「智慧汙染監測系統裝置」金屬濃度(0.091 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表...	50
表5-4	「智慧汙染監測系統裝置」重金屬(0.091 mg/L)滲漏實驗相關係數一覽表.....	51
表5-5	「智慧汙染監測系統裝置」金屬濃度(0.182 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表...	54
表5-6	「智慧汙染監測系統裝置」重金屬(0.182 mg/L)滲漏實驗相關係數一覽表.....	55
表5-7	「智慧汙染監測系統裝置」金屬濃度(0.727 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表...	58
表5-8	「智慧汙染監測系統裝置」金屬濃度(0.727 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表...	59
表5-9	樹脂理論濃度與手持式 OLYMPUS Vanta 檢測值關係一覽表.....	61



重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發

表次

表5-10	實驗室樹脂吸附試驗 OLYMPUS Vanta 檢測分析結果一覽表.....	64
表5-11	試驗農地監測樹脂種類與地號一覽表.....	71
表5-12	彰化縣鹿港鎮鹿雅段 221 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表...	74
表5-13	彰化縣鹿港鎮鹿雅段 246 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表...	77
表5-14	彰化縣和美鎮大雅段 527 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表...	80
表5-15	彰化縣和美鎮大雅段 657 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表...	83



一、前言

環保署針對受污染農地整治完成後的宣示為「未來除了著重預防，讓土地不再被污染，重點更在於開創」。人類之活動對自然生態環境造成或輕或重的衝擊。工業革命之後，科學與技術帶來了新的物質文明，提高了人類之生活水準，但隨之而來的廢棄物，亦污染了人類賴以生存的自然環境(劉黔蘭，1998)。台灣地區因事業之廢污水放流系統與農業之灌溉用水系統未完全分離，使得灌溉用水含污染物質，透過河川渠道遭受污染的農地達危害與預警管制系統等級區域約占全國農地 2.65%，約 1.5 萬公頃列入高汙染潛勢範圍。其中又以民國 102 年 12 月高雄楠梓日月光 K7 廠驚傳偷排廢水至後勁溪與民國 103 年 1 月彰化電鍍廠藉由預埋暗管將廢水排放至福馬圳最為大家所關注，部份灌溉用水引自受污染河川、埤池、或因事業單位廢水須借用灌溉渠道排放，使得農業灌溉用水含污染物質，或於渠道底泥累積污染物，導致部份農田及其生產農作物遭受污染。環保署長張子敬回顧道：「民國 89 年土污法通過，授權環保署徵收土污基金進行土水整治，90 年土污基金會因此成立。20 年來在整治實務面、法律政策面及科技運用面上不斷創新成長。」環保署統計，截至民國 110 年，列管受污染農地場址約 1,196 公頃，其中已完成改善約 1,108 公頃（約 93%），同時為加速國內污染場址改善，並建立技術典範，已研擬 3 階段土壤及地下水污染調查及整治技術認證制度，第 1 階段為「污染場址完成整治技術證明」；第 2 階段為「有效性整治技術證明」；第 3 階段為「環境技術查證」。

河川水質是影響民眾健康的重要因素，也反映了國民生活品質的情況。故各國在水資源短缺及水質惡化的情況下，掌握河川水體的污染現況、污染來源種類、河川污染特性與改善措施，成為河川污染防治的重要工作(黃信慈，2008)。台灣早期以農業為主，灌溉排水設施只是單純提供農田灌溉與排水之用。由於經濟與都市之蓬勃發展，使得人口日趨集中、工業廢水與市鎮及家庭污水劇增，公共排水溝的興建速度趕不上新興都市人口之發展，導致都市工業廢水及生活污水沒有專屬的污水道可排放廢污水，加上農田灌溉設施大部分又屬明渠形式，故大量的廢污水均利用農田水利會現有灌溉水路或排水路作為排放之途徑，不但直接影響到灌溉用水之水質，且造成許多灌溉渠道長期遭受污染(張珮錡，2001)。



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

改善水體品質，保護水生生態環境健康成為國家與城市環境治理的一個重點。

農地受污染的事實存在，但是污染源卻追查困難，重金屬在農地又具有累積性，污染行為常伴隨廢污水分佈在田間，呈現農地受多種重金屬污染的現況。許多已經復育完成之農地依然種出重金屬含量超過食米重金屬限量標準之稻米，須再進行補充調查，若污染潛勢存在，應檢討整體復育的策略。台灣之農地污染大部分發生在水田，主要係因水田需要大量灌溉用水，若灌溉水質之管理不善將導致農田暴露污染風險之中，且呈現系統性之問題(張尊國，2012)。鑑於偷排廢水事件含有不定時、延時短、污染濃度高且地點廣泛等特性。在政府稽查資源有限的條件下，建立有效監測、成本低廉與分析快速的追蹤鎖定污染源的方法實為當務之急。

土污基管會於 2021 年年底已將受污染農地幾乎全數整治完成，未來則將整合農田水利管理處、環保署督察總隊、水保處一起合作，運用科技，從有系統的監測底泥、灌溉水道即早預防農地再遭污染，並揪出污染行為人。環保署不希望農地再受重金屬污染的情事發生，因此要強化預防機制，包含對河川、灌溉渠道的底泥監測，找到污染風險，並與農田水利署合作，有系統地監測灌溉水質。預防農地受污染的方法面臨許多困難與挑戰，針對廣大的農地與預防農地受污染機制資源有限的條件下，本研究專案認為建置一個長期智慧污染監測系統且符合經濟效益的可行預警機制與環保署未來對保護農地免受重金屬污染的政策相符。藉由手持式 X-光螢光分析儀與埋入式水田土壤污染監測裝置的配合，透過智慧判斷系統評估水田長期承受重金屬負荷的變化趨勢。



二、研究目的

本研究團隊的計畫目標係研發適合水田飽和土壤入滲重金屬通量之智慧污染監測裝置，該裝置有兩個部份，分別是採樣器與監測器系統，用以評估水田栽種期間受到重金屬隨灌溉水進入農地的風險，作為預防農地受重金屬污染的預警機制，將來推廣至有重金屬污染潛勢的區域，作為保護農地生產安全的方法。考量水田受重金屬污染是一種長期含重金屬的灌溉水進入農地累積的過程，加上水田浸水狀態下呈現土壤飽和垂直入滲的特性，本研究團隊依自行研發的評估技術進一步考量台灣水田灌溉行為與田間栽種管理模式，透過改善監測裝置設計、規劃監測裝置埋設時機與位置、修正佈點位置與累積監測時間，同時搭配實驗室入滲通量率定參數等工作，以符合本研究專案計畫的目標。

農地環境因子複雜，受限於氣候條件日益複雜、農民田間管理的差異以及周遭人為隨機排放的挑戰等因素，加深建立常態化農地重金屬污染預警機制的難度與成本。本計畫所研發的水田土壤飽和入滲重金屬通量智慧污染監測裝置，單一農地一年兩次的監測數據資料的累積過程，以水田根部土壤飽和溶液作為承受最後載體的評估結果，不但有效克服上述主客觀影響的不利因素，更能呈現長期灌溉水質良窳對農地土壤的影響趨勢。另一方面，本智慧污染監測裝置亦可以灌區小組為單位，於單一農地坵塊廣泛佈設，用以評估灌溉小組承受重金屬污染威脅的空間分佈現況。離子交換樹脂對於帶電金屬有其交換特性強、吸附效率高且反應快速的特性，因農業灌溉與河川渠道的流速特性，用於追蹤重金屬污染源的效果顯著。根據水田浸水狀態下呈現土壤飽和入滲、水田牛踏層下方的負壓條件等特性，導致橫向水平流速遠低於垂直入滲速度，因此本研究專案將水田飽和土壤入滲過程以一維垂直速度為主要流向，監測圓盤裝置水平置放於水道根系底部的土壤中，與土壤飽和水入滲方向呈現垂直，以利離子交換樹脂發揮吸附交換重金屬的作用。對於預防農地受重金屬污染的預警機制可以提供一種可行的監測土壤環境品質的工具。



三、文獻探討

3.1 背景說明

違法偷排廢水事件隨著時間的累積，對環境的殘害與影響正逐漸對生活在這片土地的居民產生傷害。環保署為強化監控全台廢水排放，投注大量人力物力，管制工業區、工廠業者加裝「廢水 24 小時自動監測與連線傳輸」，密切控管有無偷排廢水，2013 年展開第 1 階段，有 35 處大型工業區完成，目標 2014 年底共 55 家業者設置完畢，掌握全台工業區 90% 以上水量即時排放情況。然而對於身處在工業區外的廠商，只能透過稽查手段來喝止違法排放發生，而發生偷排事件的地點與廠家絕大多數都發生在非工業區的範圍。

離子交換(Ion Exchange)為一可逆之交換反應，在固、液間相互進行離子交換，樹脂顆粒可從液相中，將帶有正電荷或負電荷的離子帶走，並同時將等量相同電荷離子釋出至液相中，此反應的發生不會改變樹脂本身結構。離子交換樹脂是由一聚合矩體，和附著在聚合體上的溶解性離子基組合而成，其作用基的總數和型式決定樹脂交換容量和離子選擇性(Liang et al., 2013; Manuel et al., 2008)。離子交換樹脂種類依其交換能力可分為陽離子交換樹脂(強、弱酸型)、陰離子交換樹脂(強、弱鹼型)與螯合樹脂。樹脂具有一定的可交換基濃度，為離子交換容量(ion exchange capacity)。陽離子交換樹脂的交換容量大約在 2.0-2.5 eq L⁻¹;陰離子交換樹脂的交換容量大約在 1.2-1.3 eq L⁻¹ (Eom et al., 2005)。

在自然水體的污染物質或微量元素循環研究中，其定量與定性分析的檢測項目是不可或缺的，部分化學物種在採樣和貯存過程中產生變化使檢測困難 (Davison and Zhang, 1994)。環境採樣用被動式滲透膜(passive accumulation devices, PAD) 於 1973 年研發應用，主要在採集空氣中污染物，之後擴展到水體、底泥、土壤，目標分析物包括：重金屬、有機物等 (Stuer-Lauridsen, 2005)。環保署於 2009 年開始推動被動式採樣研究工作，藉助其滲透技術捕捉水中重金屬，發展長期監測環境水質重金屬污染物之被動式採樣及檢測技術，在歐美先進國家已被積極開發作為一種生物暴露風險評估模擬之工具(凌永健，2011)。環保署於 2021 年應用縮時樹脂膠囊監測觀音工業區內工廠排放之重金屬並建立符合該工業區所屬工廠環境重金屬特徵指紋之技術模式(林聖淇，2021)。



新型態的現地被動採樣可以解決高成本連續監控儀器內水質傳感器的設置費用外（Graveline 等人，2010 年），優點包括如下：(1)允許累積加權平均或即時解測濃度（使得有可能在給定的時間段內評估河流所承載的汙染物質的總負荷量體）；(2)能夠測量傳統採樣無法檢測到的汙染物的存在（根據實際經驗，被動式採樣器甚至可以檢測微量到超微量的濃度範圍）；(3)在優先次序上，可以在較短的時間內找到水質惡化的區域；(4)在實驗室分析之前不需要大量的水的運輸和儲存。目前，國內、外並無將該技術應用在水田重金屬入滲污染監測的實際案例分析，本研究專案計畫係國內第一個針對水田飽和土壤重金屬入滲通量的完整評估設計方案。

傳統的重金屬污染監測策略通常成本高昂且不切實際。因此，需要有效的大面積監測創新的採樣和分析方法。被動式採樣是一種環境監控技術，涉及使用諸如人工設備或生物有機體之類的收集介質，以隨時間推移在環境中累積化學汙染物。這與抓取採樣相反，抓取採樣涉及在某個時間點直接從感興趣的介質中採樣。在被動採樣中，將根據設備的部署時間計算平均化學濃度，從而避免需要多次訪問採樣站點來收集多個代表性樣品的情況（Górecki et al., 2002）。國內現行的採樣標準方法，多用主動式需外加能源及人為控制的方式採樣，短時間內採集離散的少量體積樣品，後續使用標準方法檢驗，得到採樣時段的檢測結果，數據符合品保/品管規範，適時找出超出法規管制標準的汙染源，達到管制的目的。然而，對於與時俱變、且濃度變異甚鉅的汙染物，則須提高採樣的時間長度和頻率，才有可能釐清汙染者，導致工作量日增、且花費不貲；對於超微量汙染物、或是生物累積性及可利用性毒物，也需加長採樣時間，以採集到儀器足以偵測到的數量，也會遇到類似的問題。被動式採樣技術不需用外加能源及人為控制，適合長時間連續的採樣，而 DGT（Diffusive gradient in thin films）實際採樣的適用環境條件和金屬物種，分別如表 3-1 與表 3-2 所示，在歐美先進國家已被積極開發作為一種生物暴露風險評估模擬之工具（凌永健，2011）。



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

表 3-1 DGT 實際採樣的適用環境條件和金屬物種

適用水體環境	各種水體環境，如河川水、湖水		
適用水質條件	pH：4~9		
採樣天數	3~5 天，水體濃度 100ppb 最多可放置 120 天		
	金屬	用途	不適用或不能半定量的原因
適用	Mn、Ni、Cu	半定量	
	Cr、Fe、Mo、Ag、As、Sb、Se	反應濃度級數和趨勢	高濃度下載存量會增加，但與採樣天數相關性差。
	In、Cd、Ga、Ba、Pb	提供水中易解離態濃度	水中溶解性配位基 (dissolved ligand)，如溶解有機物 (dissolved organic matter) 形成錯合物，可能因體積太大通過擴散膜，或是無法被吸附樹脂截存
不適用	Al	-	不適用 CCT 模式，需用 cold plasma 分析
	Cr ⁶⁺	-	1.無法與 Cr ³⁺ 分離 2.多為 Cr ₂ O ₇ ²⁻ 樹脂吸附效果可能不佳
	Hg	-	有揮發可能性，結果誤差較高
	U	-	放射性物質，申請核准後方可購買
	Zn	-	低 pH 環境下，低濃度不易定量

資料來源：凌永健 (2011)

表 3-2 被動式採樣的優、缺點比較

被動式採樣	
優點	缺點
● 不會被消滅或死亡 ● 適用各類環境 ● 採樣程序簡單 ● 可估算水或空氣中濃度 ● 具仿生物聚集特性 ● POPs 不會被代謝產生變化 ● 採樣花費不高 ● 結果與主動式相關性高 ● 適用微量持久性有機污染物 ● 不需維護 ● 體積小 ● 只需利用採集時間得到時間重量平均濃度，不需知道採樣體積 ● 推估人體暴露量較主動式具代表性	● 環境因子 (如水流) 會影響截存速率 ● 只適用水溶性或氣相分布物種 ● 不適用離子化合物 ● 生物淤積會降低被動式採樣效率 ● 不適用監測短時間變化的濃度 ● 富集效率較主動式差 ● 需密集採樣，特別是 SPMD ● 需先做模擬實驗，估算採樣速率 ● 為非直接量測 ● 光降解 (使用 SPND 時)

資料來源：凌永健 (2011)



Sorbisense 是一家基於知識創新的公司，致力於開發，製造和銷售用於水質監測的新型專利技術。Eurofins 突破性的 Sorbisense™ 被動採樣系統旨在簡化地下水和地表水污染評估，並提供更好，更可靠的水質測試數據。透過簡化地下水和地表水污染評估，並提供更好，更可靠的水質測試數據。Sorbisense 技術提供了具有成本效益的被動採樣方法，可以作為傳統抓樣的補充或潛在替代方法。當水流過設備時，示踪劑會與體積成比例地溶解，而與採樣率無關。該原理可以非常精確地測量樣品體積和溶質質量濃度。然後可以輕鬆地取出該藥筒，並送至實驗室進行分析。獲得專利的 SorbiCell 被動採樣盒與 Sorbisystems 如圖 3-1(a) 與圖 3-1(b) 結合使用安裝單元，通常在 1-4 週內在現場部署。回收後，在實驗室對 Sorbicells 藥筒進行分析，以提供代表整個採樣週期的準確平均濃度。該方法可用於地下水、地表水（湖泊和溪流）、放流廢水。該設備缺點是收集樣本時間太短，受限示踪劑的容量，最長採樣時間僅為 28 天，無法滿足水田一期作 (120~150 天) 的監測週期；再者，被動採樣盒回收後，在實驗室還需要用強酸溶出，再由 AA 或 ICP 檢測追蹤金屬濃度值，監測效率遠低於本研究專案所研發的智慧污染監測裝置。

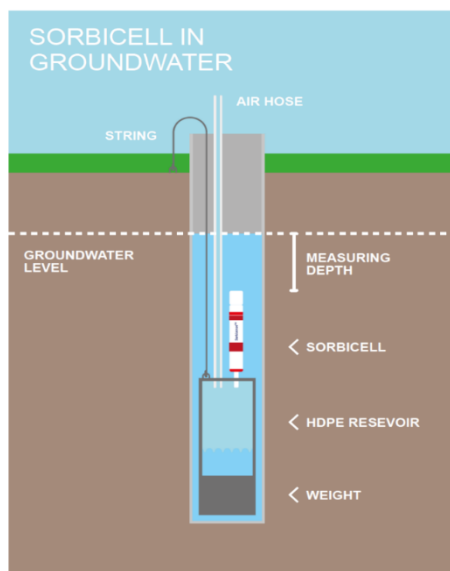


圖 3-1(a) Sorbisense™ 安裝示意圖



圖 3-1 (b) Sorbisense™ 各種類型之吸附管配件



3.2 離子交換樹脂與應用

吸附法是重金屬離子廢水處理應用中一種重要的物理化學方法，現今的研究重點主要集中在廉價、高效、易處理吸附劑的開發應用上(葉正華，1988)。離子交換法對於重金屬離子具有良好的交換特性，目前已被廣泛地用於去除廢水中的重金屬，其優點包括處理容量大，去除效率高與反應快速等(Ansari and Fahim, 2007; Donia et al., 2006)。其中，以鉻酸、硫酸銅及硫酸鎳等電鍍製程廢水的處理回收應用最為普遍(Juang and Wang, 2003; Kang et al., 2004; Eom et al., 2005; 李俊奎，2006)。離子交換樹脂吸附重金屬離子的效率會受到 pH、溫度、初始金屬濃度和接觸時間等因素的影響(Gode and Pehlivan, 2006)。然應用於污染源調查，因環境因子影響操作條件不易控制，目前國內、外尚無類似方法或設施。

所謂離子交換(Ion Exchange)，即為在一固、液間進行可逆的相互離子交換反應，樹脂顆粒可從液相中，將正電荷或負電荷的離子帶走，同時將等量的相同電荷離子釋出至水相中，此反應的發生並不會改變樹脂本身結構。樹脂包含一分子網狀結構(Molecular Network)，其上附著一離子基團(Functional Ion Group)，而樹脂上此固定離子基之電荷為一相反電荷之反離子 (Counter-ion)所平衡，以保持電中性。假若樹脂初始含有一反陽離子 A，當置入於含陽離子 B 的溶液中時，由於樹脂中之反陽離子 A 與在溶液中 A 之濃度差，和溶液中反陽離子 B 和與樹脂中 B 之濃度差，而產生一驅動力，使得陽離子 A 擴散進入溶液中，離子 B 進入樹脂中，此種離子 A 與離子 B 交換的反應，持續進行至平衡為止(如圖 3.2)。

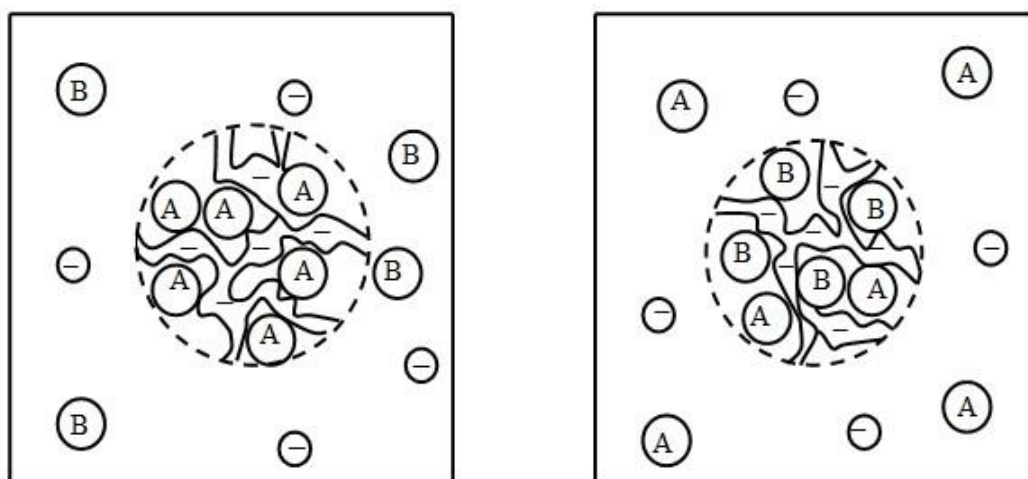


圖 3.2 離子交換樹脂交換反應平衡示意圖



將離子交換樹脂之離子 A 與 B 的交換反應，以簡單的化學計量式表示如下：



(1)式中 R-代表附著在樹脂上固定的陰離子作用基，根據質量作用定律 (Law of Mass Action)，離子交換樹脂對某一離子的選擇性(Selectivity)，可由下式表達：

$$K_A^B = \frac{[R-B^+][A^+]}{[B^+][R-A^+]} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式中 $[R-A^+][R-B^+]$ 為樹脂相中離子 A^+ 、 B^+ 之濃度， $[A^+]$ 、 $[B^+]$ 為液相中離子 A^+ 、 B^+ 之濃度， K_A^B 值：則為選擇係數(Selectivity Coefficient)，其表示當交換樹脂為 A 型時，置入一含 B 離子溶液中時，離子相對分佈的情形，亦即表示各離子對應於樹脂的相對親和力(Affinity)。但是，此值僅為一估計值，依選擇係數的大小，能定量地評估離子交換樹脂對各種離子的相對的親和力，進而可判斷其產生交換反應的先後次序。

人工合成離子交換樹脂一般是由一聚合矩體，通常為聚苯乙烯鏈 (Polystyrene chains) 藉二乙稀苯連結 (Divinylbenzene crosslinks) 而成的，和附著在聚合體鏈上之溶解性離子作用基組合而成，其作用基的總數和型式決定樹脂交換容量和離子選擇性(Liang et al., 2013; Manuel et al., 2008)。離子交換樹脂一般呈現多孔狀或顆粒狀，其大小約為 0.1~1mm，其離子交換能力依其交換能力特徵可分：

- (1) 強酸型陽離子交換樹脂：主要含有強酸性的反應基如磺酸基(—SO₃H)，此離子交換樹脂可以交換所有的陽離子。
- (2) 弱酸型陽離子交換樹脂：具有較弱的反應基如羧基(—COOH 基)，此離子交換樹脂僅可交換弱鹼中的陽離子如 Ca²⁺、Mg²⁺，對於強鹼中的離子如 Ca²⁺、K⁺等無法進行交換。
- (3) 強鹼型陰離子交換樹脂：主要是含有較強的反應基如具有四面體銨鹽官能基之—N⁺(CH₃)₃，在氫氧形式下，—N⁺(CH₃)₃OH⁻中的氫氧離子可以迅速釋出，以進行交換，強鹼型陰離子交換樹脂可以和所有的陰離子進行交換去除。



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

(4) 弱鹼型陰離子交換樹脂：具有較弱的反應基如氨基，僅能去除強酸中的陰離子如 SO_4^{2-} 、 Cl^- 或 NO_3^- ，對於 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 或 SiO_4^{2-} 則無法去除。

(5) 螯合樹脂：能引入樹脂的螯合基團有許多種，如乙二胺四乙酸 (EDTA)，它含有 $-\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{COOH})_2$ 之基團。這種螯合基團與分離離子間，既可形成離子鍵，又可形成配位鍵，構成穩定的環狀結構。其選擇性非常高，常用於處理一些貴重金屬，稀有金屬的提取與精製。

離子交換樹脂是以人工合成的聚合物，離子交換樹脂的結構如圖 3.3 與 3.4 所示，由惰性骨架(母體)，固定基團與活動離子三部份構成，由立體網狀結構的惰性骨架為母體，有規則的接上活性基團，也稱為功能基團(如 $-\text{SO}_3\text{H}$ 、 $-\text{COOH}$ 等)；樹脂本身由 S、Al、O、Ca... 等元素組成，粒徑約為 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。這種活性基團是由固定基團(如 $-\text{SO}_3^-$ 、 $-\text{COO}^-$ 等)與活動離子(即可進行交換的離子，如 H^+)組成。固定基團固定在惰性骨架上，不能自由運動，而其上的活動離子卻可再發生離子交換時，自由運動與溶液中的離子進行交換。合成樹脂時，加入一定量的交聯劑可使樹脂具有堅韌性、不溶性及一定的穩定性，但交聯劑的用量必須適當，交聯劑的用量越高，網狀結構越緊密，吸水性及溶脹性越小，但過高的交聯度，會使結構太過緊密，高分子量的離子因為立體障礙難於滲透進入樹脂中進行離子交換，所以反而降低交換反應速率。

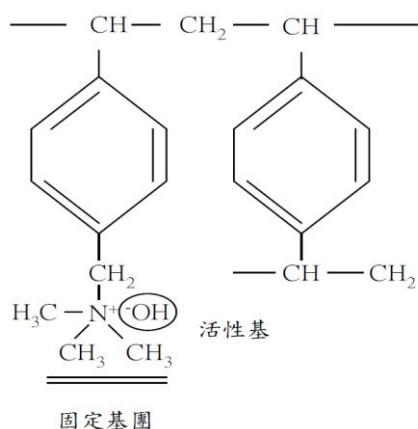


圖 3.3 陰離子交換樹脂

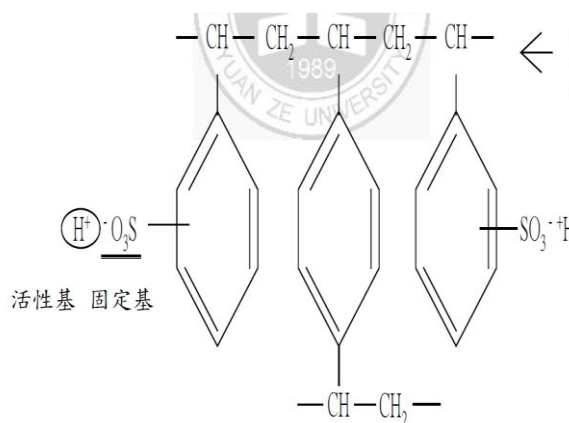
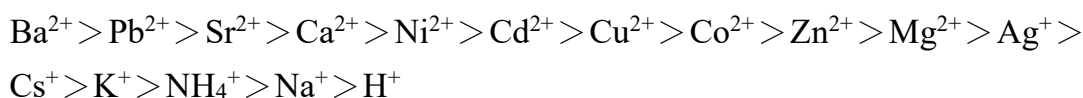


圖 3.4 陽離子交換樹脂

不論是離子交換樹脂或是沸石，都有其一定的可交換基濃度，稱為離子交換容量(ion exchange capacity)。陽離子交換樹脂的交換容量大約在 $2.0\text{--}2.5\text{ eq L}^{-1}$ ；陰離子交換樹脂的交換容量大約在 $1.2\text{--}1.3\text{ eq L}^{-1}$ (Eom et al.,



2005)。因為陽離子交換為一化學反應，故必須遵守質量平衡定律。 K 值的大小代表離子的相對趨勢， K 值愈大，離子愈易被交換，因此離子交換樹脂傾向於交換下列離子(1)具有高電荷，(2)具有較小的水合體積的離子，(3)具較大極性之離子，(4)與交換基反應較強的離子，(5)不易與其他離子形成錯合物的離子。對具有強反應基的強酸性陽離子交換樹脂（如含磺酸基， $-\text{SO}_3\text{H}$ ）而言，交換趨勢可以由下列順序表示：



如果是弱反應基的弱酸性陽離子交換樹脂， H^{+} 離子的位置是反應基的強度向左移動。對具有強反應基的強鹼性陰離子交換樹脂而言，交換趨勢可以由下列順序表示：



如果是弱反應基的弱鹼性陰離子交換樹脂， OH^{-} 離子的位置是反應基的強度向左移動。離子交換的方法常用於水或廢水的處理中，常見的實例如(1)硬水軟化處理：是環境工程上最常見的用途之一，將水中形成硬度的鈣、鎂等離子與離子交換樹脂上的鈉離子進行交換，以軟化水質；(2)除礦：利用離子交換法去除水中所有的陽離子及陰離子；(3)去除、回收廢水中的重金屬，例如電鍍工廠之廢水中所含有的鋅、銅、鎳等，都具有回收的價值。李俊奎(2006)認為離子交換技術之應用不論在理論上或技術上發展相當迅速，而其應用在技術及經濟上則必須考慮以下問題：

- (1) 離子交換劑的選擇包括容量、選擇性、價格、來源及其基本特性。
- (2) 在應用條件下需對操作過程、操作條件、操作間歇性及連續性過程之評估。
- (3) 操作過程相適應的裝置與設備之選擇與設計。
- (4) 再生劑的經濟與技術評估。
- (5) 環境問題。



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

本研究團隊於 2020 年至 2021 年間協助上準環境科技股份有限公司針對彰化縣環保局「109 年度土壤及地下水污染調查及查證工作計畫-彰化縣」與「110 年度土壤及地下水污染調查及查證工作計畫-彰化縣」項下執行水田灌期間農地引灌溝渠水之離子態重金屬累積分佈情形初探項目，如圖 3-5 所示。H-OH type 與 Na-Cl type 樹脂在監測期間(累計 3 個月)都沒有達到樹脂吸附重金屬的飽和濃度條件下，這兩種樹脂在吸附農地土壤滲漏水的溶解態重金屬(銅、鋅與鎳)的趨勢是一致地。在相同土壤重金屬濃度區間中，H-OH type 樹脂吸附重金屬濃度的區間(銅、鋅、鉻與鎳)都比 Na-Cl type 樹脂吸附重金屬濃度的區間(銅、鋅、鉻與鎳)要來的大。進一步說明埋設 H-OH type 樹脂更能有效地或靈敏地反應土壤滲漏水中溶解態重金屬的濃度變化趨勢。因此，同一地點埋設 H-OH type 樹脂在每一期水稻栽種的農地入水口處可以做為評估農地滲漏水的金屬濃度變化趨勢以及是否受灌溉水中重金屬污染威脅的工具之一。

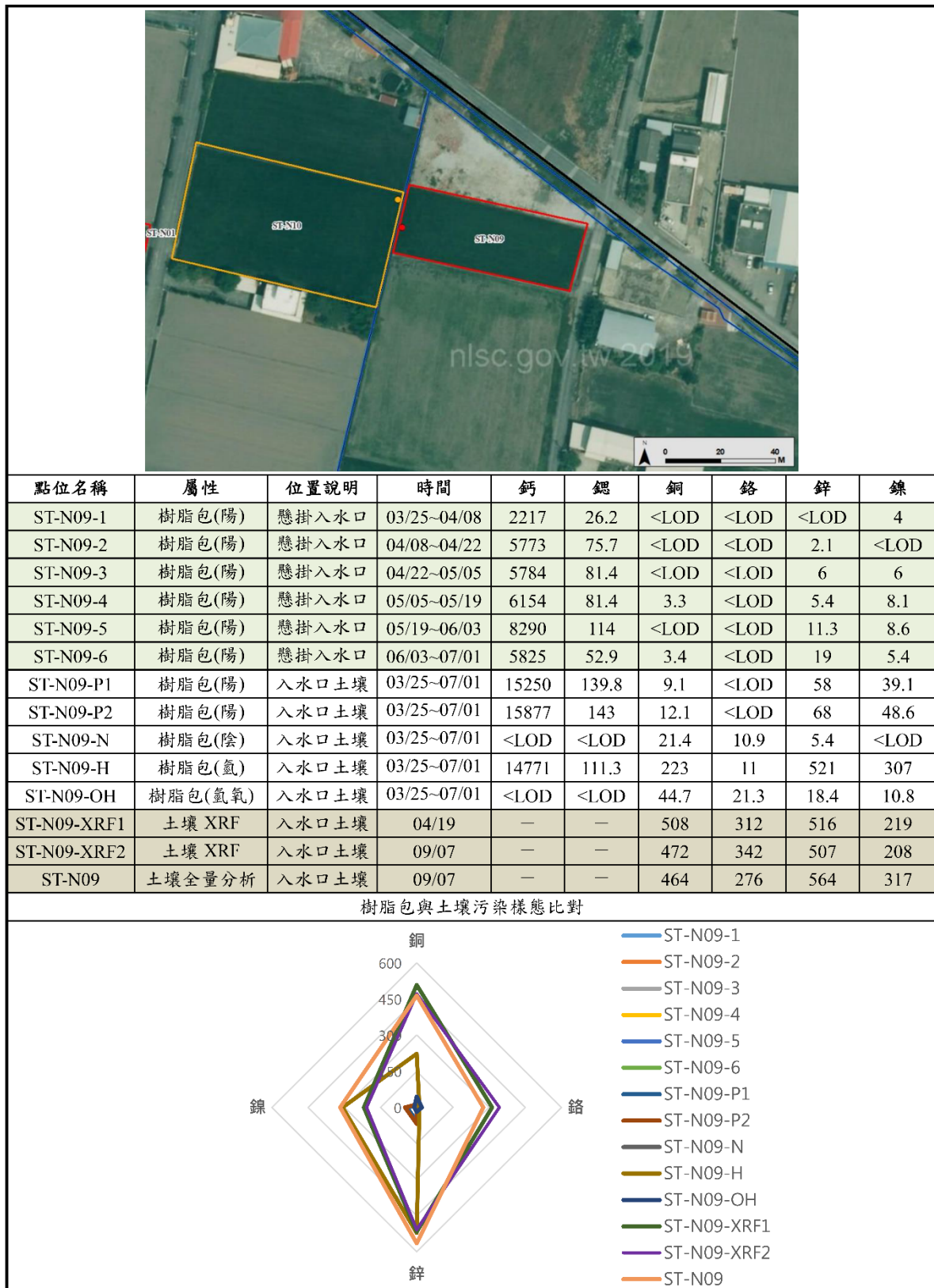


圖 3-5 鹿港鎮鹿雅段 0246-0000 地號農地樹脂包試驗結果表



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

本研究團隊協助環保署環境檢驗所於 2021 開發適合於觀音工業區以及阿公店溪應用之水質重金屬檢驗之篩測技術，應用樹脂縮時紀錄膠囊監測工業區內工廠排放之重金屬並建立圖譜，其目標在降低重金屬檢測成本，提升重金屬檢測技術之速度及便利性，透過現地樹脂縮時紀錄膠囊佈放與回收檢測，與實驗室採樣分析試驗比對，配合統計分析軟體的分析成果，建立符合觀音工業區所屬工廠以及阿公店溪環境特徵指紋使用之重金屬篩測技術模式，如圖 3-6 與圖 3-7 所示。利用主成分分析方法對觀音工業區進行工廠廢水污染物進行識別，透過現有觀音工業區管理局的廠商行業別資料庫進行相關廢水種類分類的驗證工作。結果表明，利用樹脂縮時紀錄膠囊可以有效地識別工廠廢水污染物中的主要成分，揭示廠商廢水污染物種類與行業別相互間的關係。在廢水污染物檢測指標數量較大時，可以在一定程度上簡化工廠廢水重點污染物的定量化識別過程。台灣工業區多屬中小企業，工廠多且電鍍、金屬表面業等佔比高，因批次性操作，以樹脂縮時紀錄膠囊長時間採樣較能取得代表性特徵。陰、陽離子樹脂可對不同重金屬與不同工廠（產業）有不同的吸附比例，可提供建立工業區環境水體金屬濃度基礎資料庫，因此建議後續類似計畫監測時可增加不同離子樹脂監測，提升環境水體金屬指紋的掌握與追蹤。

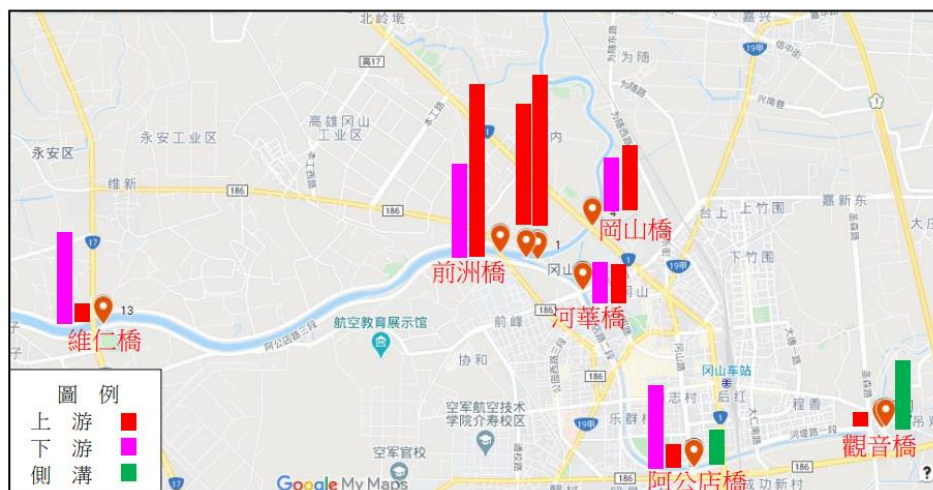


圖 3-6 高雄市阿公店溪環境特徵指紋樹脂包試驗結果位置分布圖

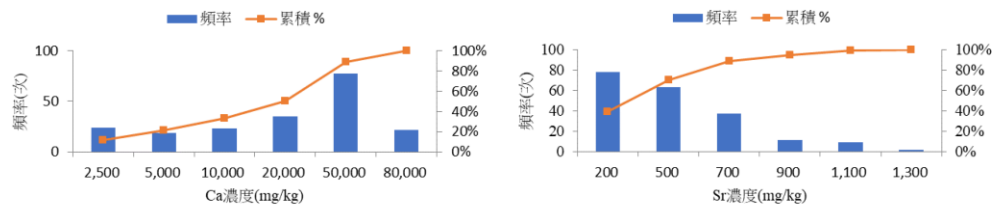


圖 3-7 阿公店溪流域樹脂包鈣與鋇檢測分析累積次數分布圖

表 3-3 高雄市阿公店溪環境特徵指紋(Zn/Ca 與 Mn/Ca)比值一覽表

地點	時間	Zn _陽	Ca _陽	Mn _陽	(Zn/Ca) _{側溝/(Zn/Ca)_{渠道}}	(Mn/Ca) _{側溝/(Mn/Ca)_{渠道}}
觀音橋	5 月	11.8	56953	151.6	4.78	4.82
		2.4	55461	30.6		
	7 月	17.7	59530	97.2	3.30	0.46
		4.2	46566	165		
阿公店橋	側溝	23.4	51405	44.1	2.54	0.54
	渠道	5.5	30730	48.8		

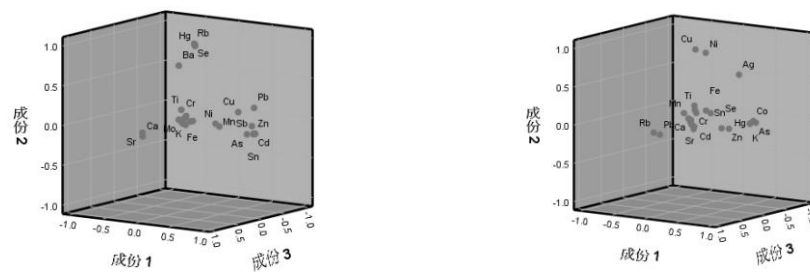


圖 3-8 高雄市阿公店溪環境特徵指紋 PCA 統計分析圖

本研究團隊於 2021 年協助慧群環境科技股份有限公司針對新北市環保局「110 年度新北市污染源調查及科學儀器查核計畫」項下執行樹林潭底溝樹脂包監測結果重金屬污染源結果比對。本計畫選用的陰、陽離子交換樹脂，在樹林潭底溝各定點位置進行水體污染溯源監測作業，監測點位編號、座標與對應資訊如表 1 所示，監測點位空間相對位置如圖 3-9 所示，監測期程分為 2 個時段，第 1 期為 08/01 至 08/07，第 2 期為 9/27 至 10/03。第 1 期樹脂包監測方法係在各監測點位於 07/31 同時間放置 7 包陽離子樹脂包與 7 包陰離子樹脂包，緊接著每隔 1 天回收 1 包陽



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

離子樹脂包與 1 包陰離子樹脂包，依序完成 7 天的監測作業，最後一天的回收日期為 08/07；第 2 期的作法亦同，最後一天的回收日期為 10/03。將監測完畢之陰、陽樹脂包進行前處理清洗與烘乾作業程序後，再利用 OLYMPUS Vanta 進行分析檢測作業。



圖 3-9 樹林潭底溝樹脂包污染溯源分組與監測點位關係位置分佈圖

其結果顯示樹林潭底溝第 I 期受污染威脅最大的點位依序是水路 2 點位 2-2，其樹脂包監測重金屬濃度為銅金屬(5,374~17,623 mg/kg)，推估銅金屬人為污染排放時間落在 08/04(星期三)；水路 3 點位 2-4，其樹脂包監測重金屬濃度為鎳金屬(892~2,648 mg/kg)，推估鎳金屬人為污染排放時間落在 08/04(星期三)，如圖 3-10 所示。樹林潭底溝第 II 期受污染威脅最大的點位是水路 2 點位 2-2，其樹脂包監測重金屬濃度為銅金屬(53~1,916 mg/kg)，推估銅金屬人為污染排放時間落在 09/29(星期三)；水路 2 點位 2-3，其樹脂包監測重金屬濃度為銅金屬(77~2,462 mg/kg)，推估銅金屬人為污染排放時間落在 10/01(星期五)；水路 3 點位 2-4，其樹脂包監測重金屬濃度為銅金屬(56~1,342 mg/kg)，推估銅金屬人為污染排放時間落在 10/01(星期五)。



文獻探討

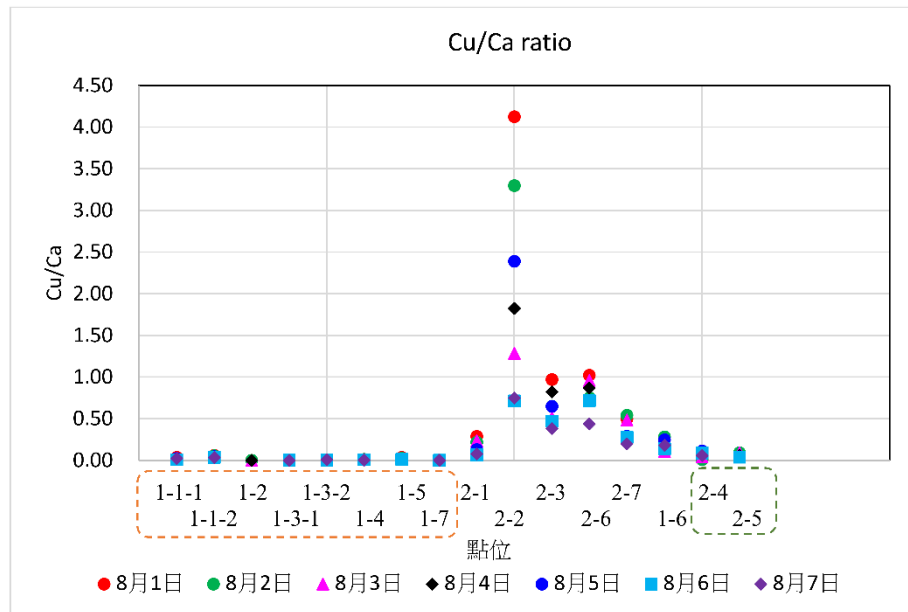


圖 3-10 樹林潭底溝第 I 期重金屬銅濃度與 Cu/Ca 關係圖



四、研究方法與過程

4.1 研究架構

為提供環保署對整治完成受重金屬污染農地土壤一種新穎的預警機制，台大水工所延續既有「樹脂縮時膠囊」之研究基礎，考量水田浸水狀態下呈現土壤飽和入滲的特性(一維垂直入滲為主)，進一步改良與研發適合水田飽和土壤入滲重金屬通量之智慧污染監測裝置，用以評估水稻栽種期間受到重金屬隨灌溉水進入農地的風險。本研究設計主軸為「著重預警機制的可靠性與穩定性，讓土地不再被污染，重點更在於創新」。隨著「智慧污染監測系統裝置」的監測數據累積，透過機器演算法的學習技能處理所獲得的大數據資料庫，進而評估該農地土壤重金屬濃度的變化趨勢，其所產出的趨勢結果與預測就是人工智慧的成果。

本研究為完成「智慧污染監測系統裝置」之研發設計，將其研究架構分為實驗室與現地試驗兩個方向。實驗室部份著重於「智慧重金屬污染監測裝置」之研發與形狀設計，埋設在水田土壤中達到吸附重金屬(吸附實驗設計)與現地可適用性最佳化(取樣方便)之功能，其流程如圖 4-1 所示；現地試驗係利用樹脂離子交換為基材做成離子交換樹脂圓盤採樣器，將其埋設於監測之點，一段時間(稻作生長期)後收回監測採樣器利用手持式 X-射線螢光光譜儀快速分析測定重金屬的元素含量分布特性，所吸附之重金屬可做為判定水田在栽種水稻期間，灌溉水是否含有其他重金屬污染來源的證據之一，其流程如圖 4-2 所示。在計畫執行中，針對農田試驗區選址的過程，因耕種農民對於「智慧重金屬污染監測裝置」的埋設對農耕行為產生影響而多有疑慮，因此該採樣器埋設時間建議選在農民插秧完成後再進行埋設作業。

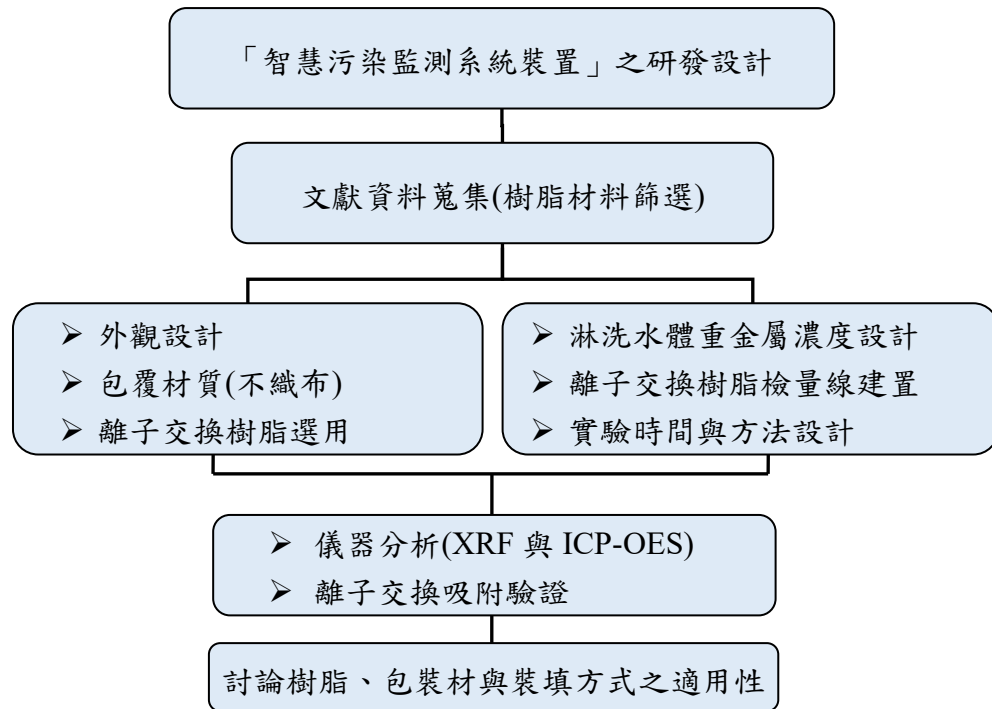


圖 4-1 實驗室試驗研究流程圖

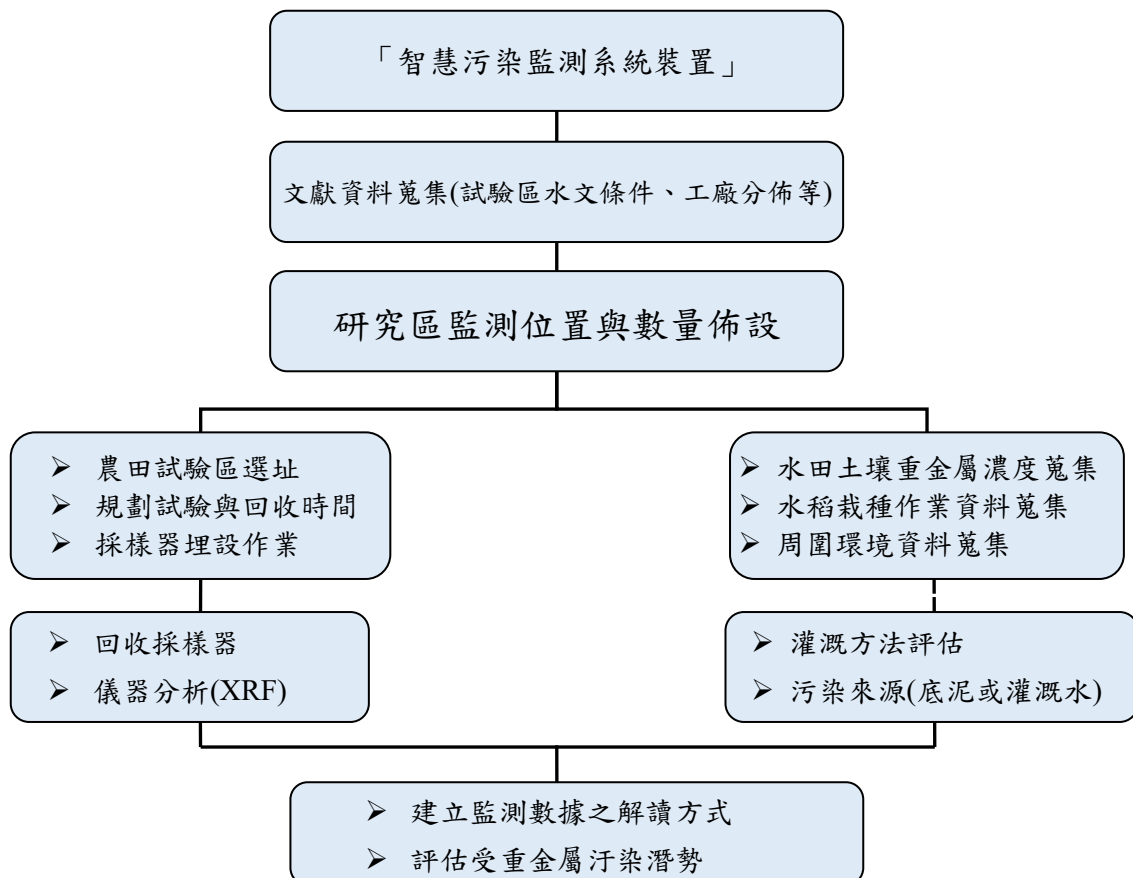


圖 4-2 現地試驗研究流程圖



4.2 研究區域

本研究除了進行實驗室交換樹脂的陽離子吸附實驗之外，規劃彰化縣東西二、三圳灌排系統做為現地實驗測試地點，其環境現況描述如下：

彰化水利會供水範圍包含南投縣西部及彰化縣(烏溪下游灌區及濁溪北岸)，灌區介於烏溪與濁水溪兩河流之間，東起平林溪、貓羅溪，西臨台灣海峽，南抵濁水溪與雲林縣毗鄰，北以烏溪與台中市為界，整個區域地形南寬北窄呈現等邊三角形，灌溉面積高達 4 萬餘公頃(如表 4-1)，渠道總長度約 1,800 公里。其中八堡圳、荖仔埤圳為最大灌溉系統，由集集攔河堰經北岸聯渠道取水灌溉(如表 4-2)。烏溪系統區僅祇提供全彰化灌溉量 17.6%，而且都集中在最北邊的彰化市，本計畫涵蓋之圳路呈東西走向，長度約有 13.5 公里長，早期的灌溉面積約有 1,600 公頃，後來隨著農業的不景氣，如今灌溉面積只剩 800 至 1,000 公頃。研究計畫區內東西二圳長度 18,000 公尺，東西三圳長度 12,000 公尺。

表 4-1 彰化農田水利會灌溉系統所屬圳路灌溉面積與用水量

水利會	水系	圳路	總計灌溉面積(公頃)	總用水量(萬噸)
彰化水利會	濁水溪	同源圳、八堡一圳、八堡二圳、荖仔埤圳、永基二圳、永基三圳、深耕二圳、深耕三圳、大義慶豐圳、義和圳、菁埔圳、泉成圳、挖子圳、頭汴圳	39,936	97,000
	烏溪	東西二圳、東西三圳、番子田圳、溪頭上埤、溪頭下埤、福馬圳	5,629	19,839
合計			45,565	116,839

資料來源：經濟部水利署中區水資源局 <http://www.wracb.gov.tw/ct.asp?xItem=897&ctNode=898&mp=6>



東西二、三圳位於台灣中部彰化縣內，水源自貓羅溪，渠道流經彰化市與和美鎮，灌區內各類工廠林立，其中電鍍業登記搭排者有 44 家，廢水量為 1,740 噸/日(徐玉標等，1993)，零星並有未登記電鍍廠密集分佈在支流或小給水路，廢水間歇排出，常使某些農田受害(朱海鵬等，1992；行政院環保署，1990；Alloway, 1990)。因彰化市與和美鎮為中部地區主要金屬表面處理業與電鍍業聚集區域，以往業者均以搭排形式將含重金屬污染物之廢水排入該流域中，造成東西二圳沿線各水質監測站重金屬檢測結果常出現異常。

根據彰化農田水利會網頁資料，東西二、三圳主要水源係於彰化市快官取自烏溪支流貓羅溪，輔以 8 口深水井，流域灌溉面積 1,095 公頃(如圖 4-3 所示)，均為兩期作物，最高計畫流量為 6.095 CMS，到水流公制水門的計畫流量為 2.445 CMS，考量流域上游的重金屬污染因具有蓄積作用且影響範圍廣，加以彰化縣環境保護局先前針對水流公制水門之水質監測顯示該處之水質長期超出灌溉用水水質標準。為掌握轄內各水域特別是灌溉渠道之污染情形，彰化縣環境保護局自 91 年開始即針對東西二圳流域幾個代表性的監測點進行水質監測紀錄，依據 97 年至 99 年間的水質監測資料顯示以銅(Cu)及鎳(Ni)污染物濃度超過灌溉用水水質標準之比率最高(謝心色，2011)。行政院環境保護署每季於貓羅溪上游利民橋測站監測之重金屬，資料顯示在利民橋測得的銅(Cu)濃度均低於 0.01mg/L，鋅(Zn)均低於 0.03mg/L。



圖 4-3 彰化縣東西二、三圳灌排分布圖



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

表 4-2 彰化農田水利會灌溉系統與圳路

系統別	渠道(圳路)別	灌區別
烏溪	貓羅溪	上埤幹線
		下埤幹線
		番子田圳
	東西圳	東西二圳
		東西三圳
	福馬圳	六股圳
		四股圳
		新埤舊圳
濁水溪	同源圳	同源圳幹線
		炭寮幹線
		舊圳幹線
		第一支線
	八堡圳	八堡一圳
		八堡二圳
	荖仔埤圳	荖仔埤幹線
		永基二圳
		永基三圳
		深耕二圳
		深耕三圳
	舊濁水溪	舊濁水溪南岸
		舊濁水溪北岸
	頭汴埤	頭汴圳
		新圳



4.3 研究方法

本研究專案主要分為實驗室滲漏計通量率定試驗與農地實務驗證試驗等兩個工作項目，如圖 4-4 所示。實驗室滲漏計通量率定試驗在台大水工試驗所進行，內容包含離子交換樹脂重金屬濃度 XRF 檢量線建置、入滲通量監測裝置設計、滲漏計通量率定(鈣與鋁)、重金屬滲漏量率定(銅與鋅)以及評估重金屬入滲通量模式；農地實務驗證試驗則是以彰化水利管理處轄下灌區與其他高污染潛勢區域作為研究區域，內容包含水田背景資料蒐集與選定、監測裝置佈設規劃與設計、監測裝置埋設與回收作業以及樣本前處理與 XRF 檢測作業。最後，根據本研究所得樹脂種類與其入滲通量率定參數與水田飽和土壤重金屬入滲通量適用性的結果，進一步建立評估水田飽和土壤重金屬入滲通量標準作業程序，將來可作為第一線預防土壤受重金屬威脅的預警機制的工具之一。

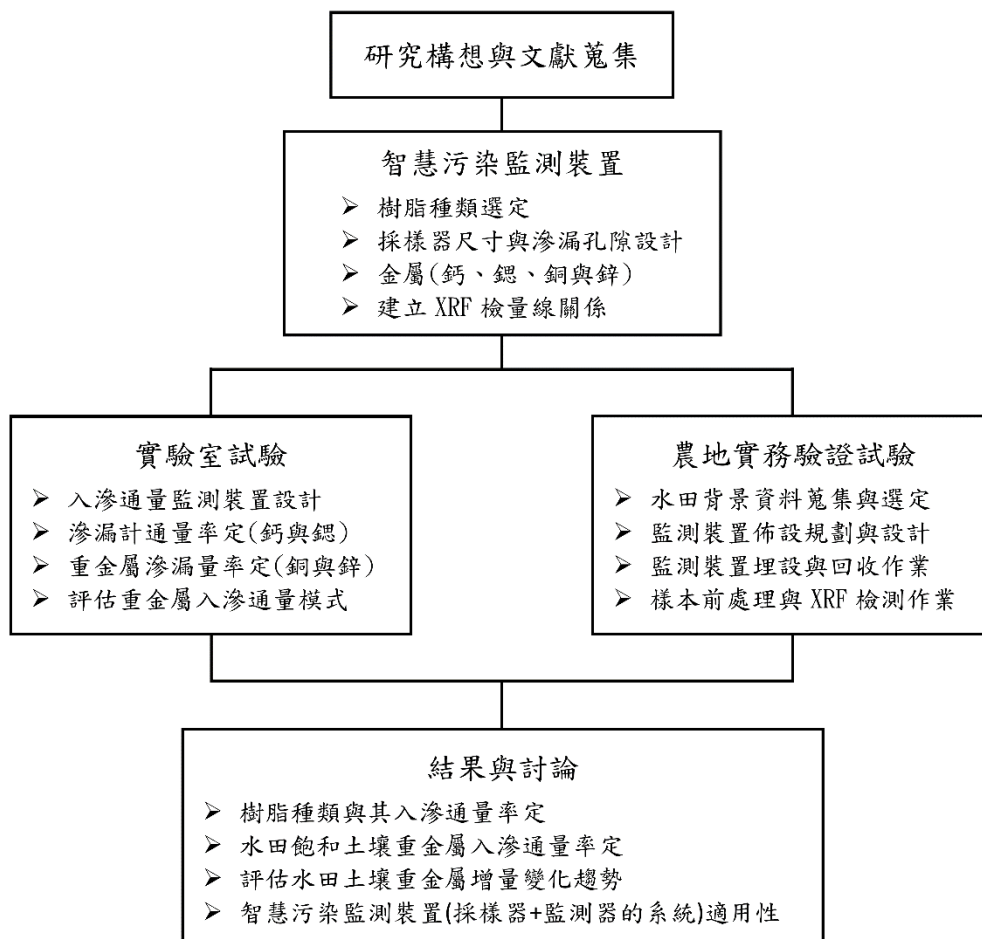


圖 4-4 本研究專案試驗流程圖



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

鑒於環保與農政單位已將土基會研究專案所開發的「樹脂縮時膠囊」逐漸納入例行性對灌溉水質監測的方法之一，然面對氣候變遷下水環境的劇烈變異與工廠坐落區位的日益複雜等現況，本研究於計畫項下增列蒐集目前相關執行單位在監測水質重金屬污染過程中所面臨的問題與挑戰，透過舉辦 1 場專家諮詢討論會作為意見交流園地，提供縣市環保局、環保署督察總隊、水保處以及農水署等單位問題諮詢的窗口，普及「樹脂縮時膠囊」以及「智慧污染監測系統裝置」的應用基礎與科學數據判斷重金屬污染源追蹤的方法，進一步落實該技術的實用性與適用範圍。

手持式 X-射線螢光光譜儀(簡稱 XRF)之檢測原理是利用放射源照射樣品後所放射出之螢光，經過偵測器的監視窗，並轉換成電子訊號傳輸至偵測器，再經由多頻道分析器(MCA)所收集到之各元素脈衝振幅，以分析及定量樣品中元素濃度初估值。本研究專案使用國立臺灣大學水工試驗所的 XRF，該儀器型號為 OLYMPUS Vanta，如圖 4-5 所示。



圖 4-5 手持式 X-射線螢光光譜儀(XRF)

早期離子交換的材料為天然或人工合成的沸石(Zeolites)，其為鋁鹽和矽酸鹽混合的礦物質。當此種材料以食鹽水將其轉化成鈉型時，能有效地應用在於水質軟化。然而，由於其交換容量低，同時此礦物質會溶解，使處理水中的矽含量增加，因此在 1930 年代後期，人工合成的樹脂被研究推廣後，直到今日大部分的離子交換樹脂都是採用聚合矩體(Polymer Matrix)的合成材料(李俊奎，2006)。人工合成離子交換樹脂是由一聚合矩體，通常為聚苯乙稀鏈(Polystyrene Chains)藉二乙稀苯連結



研究方法與過程

(Divinylbenzene Crosslinks)而成的，和附著在聚合體鏈上之溶解性離子作用基組合而成。而在樹脂上作用基的總數和型式決定樹脂交換容量和離子選擇性。

「智慧污染監測系統裝置」係直接埋設在水稻田根部區域的土壤中用以在特定時間間隔所含重金屬通過的濃度變化情形，做為污染源的環境指紋辨識方法，其優點是監測成本低廉與分析快速(手持式 XRF)，再者其紀錄污染源排放的敏感度(重金屬濃度)與位置(移動性低)比直接監測水田土壤重金屬濃度所反應的現況要來得敏感。本研究在實驗室與現地亦同步進行樹脂採樣器埋設吸附分析實驗，做為後續資料分析與檢視修正之參考依據。



4.4 「智慧污染監測系統裝置」研發

本研究專案構想是搭配一個採樣器與監測器的系統作為評估水田飽和土壤重金屬入滲通量的智慧污染監測系統裝置，如圖 4-6 所示。其填充交換樹脂的裝置選用需有良好通透性(利於重金屬陽離子交換進行)以及材質本身不能含有重金屬(避免影響實驗結果)之要求，最後選用食用級之耐酸鹼 PVC 材質等級做為扁形圓盤採樣器之外觀設計。如土壤飽和滲透係數為 10^{-5} (公尺/日) 截面積為 5 平方公分，可計算出一期水稻的入滲通量，另外估算一期作水稻田的入滲水量是 1.2 公尺的深度，監測期間的離子濃縮至 1-2 公分的樹脂厚度，預估可將受監測重金屬污染濃度放大至少 120 倍以上。



圖 4-6 智慧污染監測構想設計示意圖

現地農地試驗驗證初步規畫在彰化或台中水利管理處轄下灌區與其他高污染潛勢區域作為研究區域，內容包含水田背景資料蒐集與選定、監測裝置佈設規劃與設計、監測裝置埋設與回收作業以及樣本前處理與 XRF 檢測作業。首先針對水田背景資料進行蒐集，規劃選定至少 2 個灌溉小組，每個灌溉小組選定至少 2 個農地坵塊進行監測作業，依據農地坵塊的出入水口位置，在每個農地坵塊設置至少 3 個監測點位，每個點位埋設陰、陽離子交換樹脂各 3 個，如圖 4-7 與圖 4-8 所示(實際選定)。本監測裝置埋設時間係在水田整田後，監測期間涵蓋一個期作的水稻栽種期(約 120~150 天)，在監測裝置埋設前後，分別採集對應土壤樣本作為重金屬濃度變化的參考比較依據，農地土壤背景值檢測遵循環檢所土壤和底泥中元素濃度



研究方法與過程

快速篩選方法－攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法 (NIEA S322.60C)。本計畫農地現地檢測項目包含監測裝置的陰、陽離子交換樹脂以及對應的土壤樣本，合計檢測陰、陽離子交換樹脂的數量為 72 個，土壤 XRF 檢測數量為 12 個，如表 4-3 所示。

表 4-3 農地汙染採樣器離子交換樹脂與土壤檢測數量一覽表

項目	種類	陽離子交換樹脂	陰離子交換樹脂	水田土壤
個數		36	36	12

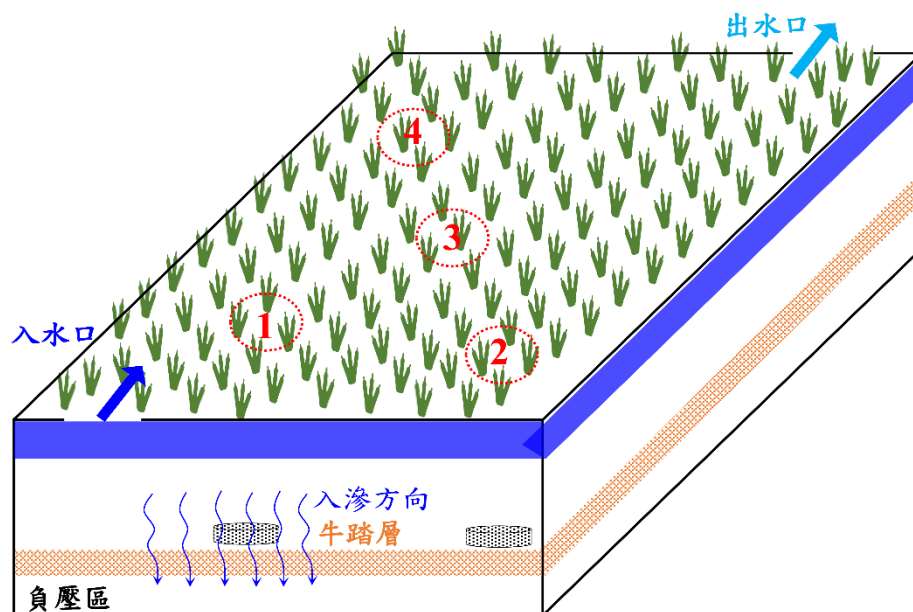


圖 4-7 水田監測裝置埋設空間分佈示意圖



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發



圖 4-8 水田監測裝置埋設空間分佈圖(以大雅段 716 地號為例)

本研究計畫係以離子交換樹脂為基材研發出「智慧污染監測系統裝置」，利用樹脂離子交換水中重金屬之快速及強大能力，將該採樣器埋設於定點即可紀錄自埋設監測至回收這段時間內水田入滲之重金屬通量變化。利用 X-射線螢光光譜儀(X-ray fluorescence, XRF) 或類似的儀器可快速檢測樹脂所含目標元素的濃度，檢視潛在污染源空間地理位置的相關性，作為水田栽種期間灌溉水承受重金屬汙染分佈特性的科學證據，所有非自然排污行為進入水稻田即被有效掌握。

「智慧污染監測系統裝置」的優點是監測成本低廉、效率高與分析快速，再者其紀錄污染源排放的敏感度(重金屬濃度)與位置(固定地點)遠高於對水樣與底泥採樣所能反應的現況，是針對提供夜間、假日或間歇性等偷排行為的科學證據的一大利器。

「智慧污染監測系統裝置」之製作方法與設計說明如下：

- (1) 「智慧污染監測系統裝置」採樣器的填充基材為離子交換樹脂，該材料一般呈現多孔狀或顆粒狀，依其交換能力特徵可分為強(弱)酸型陽離子交換樹脂、強(弱)鹼型陰離子交換樹脂與螯合樹脂等五種。鑒於水田土壤滲漏水的流速緩慢以及滲漏水中重金屬濃度偏低等特點，僅有交換能力強大的離子交換樹脂才能把滲漏水中溶解態重金屬的訊號加以放大，



研究方法與過程

其他型態的離子交換樹脂的交換能力無法達到手持式 XRF 所需的檢測極限濃度之要求。因此，本計畫依其監測目標的重金屬污染源種類分別選定強酸氫型陽離子交換樹脂與強鹼氫氧型陰離子交換樹脂作為「智慧污染監測系統裝置」的填充基材。

- (2) 填充交換樹脂的填充袋選用需有良好通透性(利於重金屬陽離子交換進行)、材質本身不能含有重金屬(避免干擾吸附結果)以及需要能夠耐浸泡、耐酸鹼之基本要求，本發明因此選用不織布或網狀聚酯纖維材質做為填充袋。
- (3) 避免「智慧污染監測系統裝置」體積太大而影響水稻田入滲水體的流動性，其內採樣器的設計成類圓柱形長方體樣式。在採樣器監測中間預留一個圓孔作為固定離子交換樹脂與外框之用。緊接著再將適量交換樹脂分別置入透水性良好之不織布或網狀聚酯纖維內，維持水分子能自由進出採樣器不受阻隔。
- (4) 在上述的設計概念下，「智慧污染監測系統裝置」將採樣器固定在塑料(PE、PVC 等)中空圓柱體(周圍孔隙大)的中間位置，圓柱體前後都鑿空減少水體通過的阻力，增加監測包內水流的通量。



4.5 實驗室設計

陽離子交換樹脂利用氫離子(H^+)來交換水中的陽離子;而陰離子交換樹脂則利用氫氧根離子(OH^-)來交換陰離子,氫離子與氫氧根離子互相結合成中性水。利用鈉離子 Na^+ 代表所有的陽離子,而利用氯離子 Cl^- 代表所有的陰離子來進行離子交換反應,其反應示意圖分別如圖 4-9 與圖 4-10 下所示:

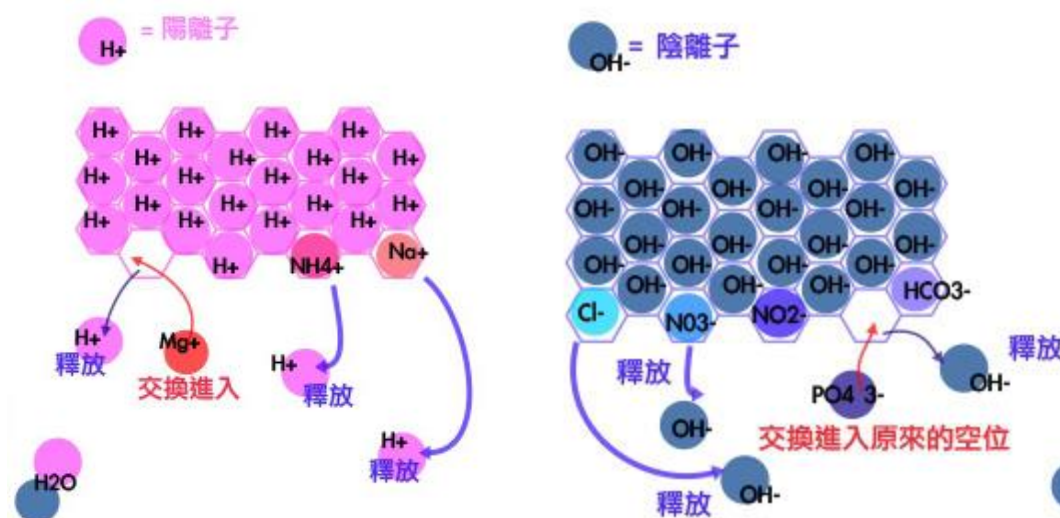


圖 4-9 陽離子交換樹脂反應示意圖 圖 4-10 陰離子交換樹脂反應示意圖

根據不同應用的需求,不同的陰/陽離子交換樹脂的化學官能基有強弱之分,導致其交換能力(純化能力)及再生條件皆有所不同。本研究選用陰離子與陽離子交換樹脂交互配製,其中氫型陽離子交換樹脂對重金屬有高親和力,由 Purolite 公司製造,其主要分子結構為凝膠交聯聚苯乙烯(Gel polystyrene)符合 1% DVB,它是非常穩定的巨大網狀結構樹脂,官能基為磺酸,其基本物性與外觀分別如表 4-4 與圖 4-11 所示。現地實驗所使用陰離子交換樹脂為氫氧型陰離子交換樹脂,由 Dow 公司製造,主要分子結構為苯乙烯-二乙烯基苯,官能基為季銨陽離子,其基本性質與外觀分別如表 4-5 和圖 4-12 所示。



表 4-4 氫型陽離子交換樹脂之基本性質

項目	內容說明
名稱	HPR1300 H
應用	硬水軟化(Softening)、水體純化(Demineralization)
高分子結構	凝膠交聯聚苯乙烯(Gel polystyrene)
官能基	磺酸(Sulfonic acid)
離子交換形式	氫型(H^+)
陽離子交換容量	$\geq 2.0 \text{ eq/L}(H^+ \text{ form})$
含水率	46.0-52.0 %
顆粒粒徑範圍	$650 \pm 50 \mu\text{m}$
顆粒密度	1.22 g/cm^3
顆粒耐受溫度	5-120 $^{\circ}\text{C}$
單價	300~400 元/公升

資料來源：https://www.hopegood.com.tw/guest/service_detail/119

圖 4-11 氫型陽離子交換樹脂外觀



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

表 4-5 氫氧型陰離子交換樹脂之基本性質

項目	內容說明
名稱	HPR4800 OH
應用	工業脫鹽(Industrial Demineralization)
高分子結構	苯乙烯-二乙烯基苯(Styrene-divinylbenzene)
官能基	凝膠交聯聚苯乙烯(Gel polystyrene)
離子交換形式	氫氧型(OH ⁻)
陰離子交換容量	≥1.0 eq/L(OH ⁻ form)
含水率	58.0-74.0 %
顆粒粒徑範圍	610±50 μm
顆粒密度	1.07 g/cm ³
顆粒耐受溫度	5-60 °C
單價	500~600 元/公升

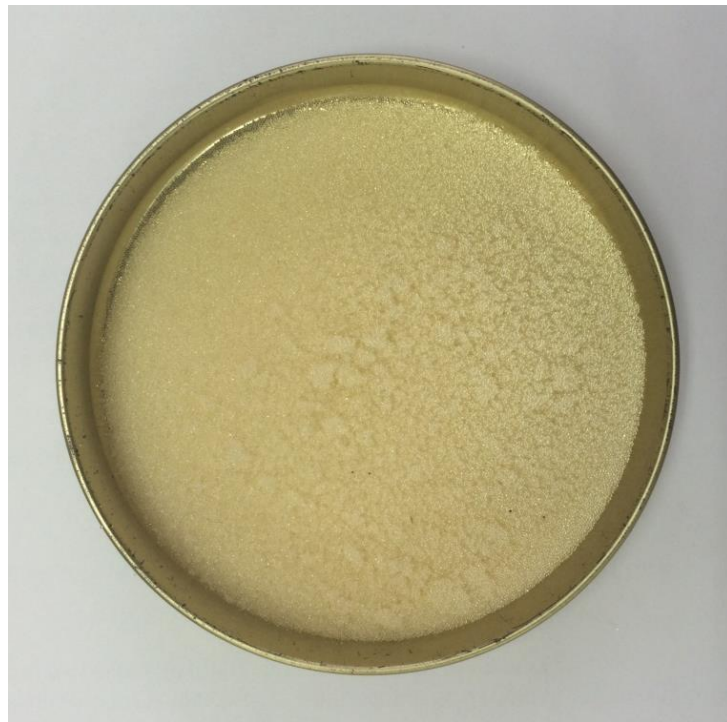


圖 4-12 氫氧型陰離子交換樹脂外觀

本研究實驗室試驗填充交換樹脂的裝置選用需有良好通透性(利於重金屬陽離子交換進行)以及材質本身不能含有重金屬(避免影響實驗結果)之要求，最後選用食用級之不織布材質做為填充袋。考量增加入滲水體與



交換樹脂的接觸面積最大化、避免產生過多實驗廢液以及實驗儀器空間的限制等因素。實驗室用「智慧污染監測系統裝置」採樣器之設計外觀尺寸建議為 5*6 cm，內含填充交換樹脂重量為 10 公克左右。

手持式 X 光-螢光分析儀(簡稱 XRF)的燈管壽命會隨著使用時間的增加而減少，本研究團隊透過金屬(銅、鋅、鈣與鋇)檢量線率定作為確保 XRF 對離子交換樹脂的金屬濃度的準確性與穩定度。依據歷年檢測「樹脂縮時膠囊」的累積檢測資料與 2020~2021 年間在彰化縣進行農地離子交換樹脂埋設監測作業得知，初步設計銅、鋅、鈣與鋇的減量線濃度範圍分別為 0~500 mg/kg(銅與鋅)、0~100,000 mg/kg(鈣)與 0~1,000 mg/kg(鋇)；選定陰、陽類型離子交換樹脂分別為氫型離子交換樹脂與氫氧型離子交換樹脂兩種。監測裝置設計以圓盤樣式為基礎，分別填裝陰(氫氧型)、陽(氫型)離子交換樹脂，圓盤上下方以雷射雕刻機進行打孔或透水膜方式固定不讓離子交換樹脂逸失。

為模擬與推估水田飽和土壤金屬入滲通量的適用性，先行於實驗室以滲漏計進行不同滲漏通量試驗測試。智慧污染監測裝置埋設於滲漏計土層下方 30 公分處，擺置陰、陽離子交換樹脂各 3 個監測裝置，而定水頭的設計方式係為維持滲漏計土壤層上方的浸水狀態，下方滲漏調節開關用以調整監測期間的滲漏量大小，如圖 4-13 所示。因不同土壤粒徑種類，反應在水田入滲量的多寡，考量彰化地區的土壤特性(黏土、壤土與砂質壤土等)，本實驗設計滲漏量介於 1.0~6.0 mm/hr，滲漏通量分別為 0 mm/hr、3.0 mm/hr 以及 6.0 mm/hr，每批次試驗累積滲漏量為 100~120 公分(水稻一期作灌溉水深 180 公分估算)，預計滲漏累積時間介於 5~25 天。參考農水署頒佈的農田灌溉排水管理辦法之灌溉水質基準值管制項目限值(如表 4-7)以及台大工所歷年的灌溉水質連續監測數據資料庫，將本試驗滲漏水的銅、鋅、鈣與鋇金屬濃度設計統一採用 ICP 標準溶液作為配置濃度之用，濃度設計分別為 0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L。

每批次滲漏試驗進行前檢測水中、土壤以及監測裝置離子交換樹脂的銅、鋅、鈣與鋇金屬的濃度值，待完成滲漏試驗後分析滲漏水、土壤與監測裝置離子交換樹脂的銅、鋅、鈣與鋇金屬的濃度。本試驗使用標準溶液配置特定重金屬濃度滲漏水的 pH 值皆介於 1.0~3.0 間，吸附結果與效率並沒有受到 pH 值的影響。依據上述數據資料，建置評估監測裝置在滲



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

漏計的飽和土壤中重金屬入滲通量變化參數，作為日後驗證水田農地智慧污染監測裝置的適用性與可靠性的依據。

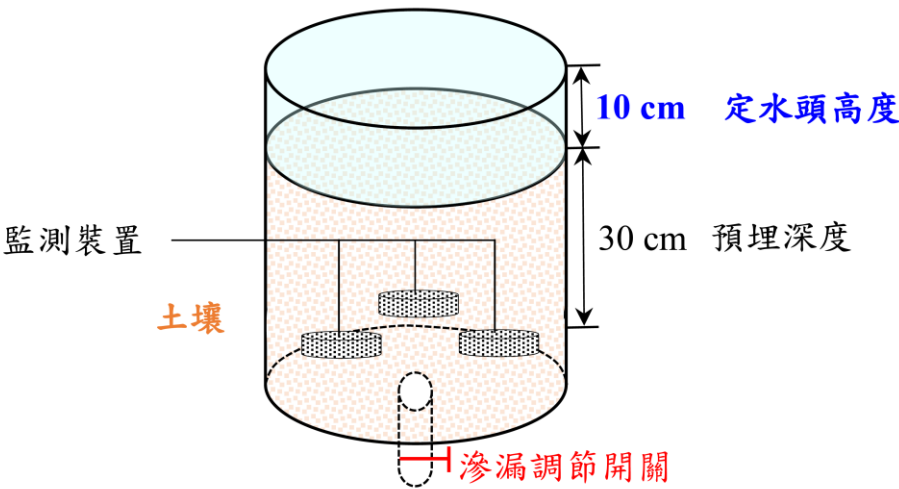


圖 4-13 實驗室滲漏計示意圖

表 4-6 滲漏計污染採樣器離子交換樹脂與介質(砂粒)檢測數量一覽表

項目	種類	陽離子交換樹脂	陰離子交換樹脂	滲漏計介質(砂粒)
滲漏速率		3	3	3
個數		27	27	27
XRF 分析數量		27	27	27



圖 4-14 實驗室滲漏試驗現況圖



研究方法與過程

表4-7 灌溉水質基準值之管制項目

單位：mg/L

編號	管制項目	限值
1	總鉻(Cr)	0.1
2	鎳(Ni)	0.2
3	銅(Cu)	0.2
4	鋅(Zn)	2.0
5	鎘(Cd)	0.01
6	鉛(Pb)	0.1
7	砷(As)	0.05
8	汞(Hg)	0.002

資料來源：農田水利署(2022)



4.6 實驗室分析與 QA/QC

X-射線螢光光譜儀之檢測原理是利用放射源照射樣品後所放射出之螢光，經過偵測器的監視窗，並轉換成電子訊號傳輸至偵測器，再經由多頻道分析器（MCA）所收集到之各元素脈衝振幅，以分析及定量樣品中元素濃度初估值。本研究專案使用國立臺灣大學水工試驗所的 XRF，該儀器型號為 OLYMPUS Vanta，如圖 4-5 所示。

每一個原子都有自己固定數量的電子（負電微粒）運行在核子周圍的軌道上。而且其電子的數量等同於核子中的質子（正電微粒）數量。從元素周期表中的原子數我們則可以得知質子的數目。每一個原子數都對應固定的元素名稱，例如鐵，元素名是 Fe，原子數是 26。能量色散 X 螢光與波長色散 X 螢光光譜分析技術特別研究與應用了最內層三個電子軌道，即 K、L、M 軌道上的活動情況，其中 K 軌道最為接近核子，每個電子軌道則對應某元素一個個特定的能量層，如圖 4-15 所示。本計畫使用手持式 XRF(OLYMPUS Vanta)離子交換樹脂重金屬濃度檢測極限數據如表 4-13 所示。

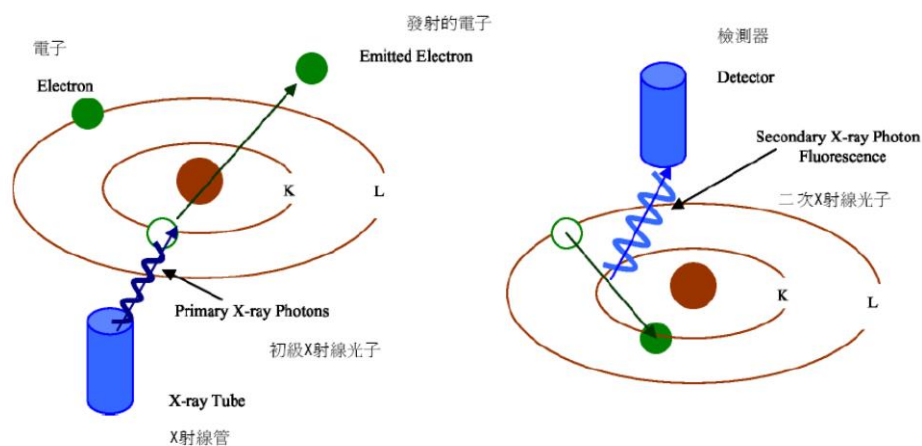


圖 4-15 X-射線螢光光譜儀測定原理

手持式 X-射線螢光光譜儀之檢測流程如下所述：

- (1) 分析前 XRF 儀器需經過標準品檢定，確保 XRF 螢光燈管強度符合儀器設定。
- (2) 樣本經風乾的前處理後，均勻化交換樹脂樣本，置於儀器專用塑膠盒內，並等待分析。



研究方法與過程

- (3) 受檢之樣品表面應該盡量平坦，以便儀器的視窗有較佳表面接觸，得到較好的重複分析和代表性。
- (4) 儀器設定每個樣品偵測點位接收時間為 180 秒，進行樣本重金屬濃度檢測分析。

A. 樣品採樣程序

陰、陽離子交換樹脂規格初步選取如表 4-4 和表 4-5 所示，將樹脂包置於水田土壤深度約 20-30 公分處，並固定於現場，視農地狀況及出入水口位置進行 4 個不同點位，每個點位以三重複方式佈放，確保污染採樣器內的離子交換樹脂採集之濃度穩定與再現性，同時使用上下透孔的圓盤設計方式包覆陰、陽離子交換樹脂來維持水分子可自由進出污染採樣器，進而確保其通量的穩定及數據具有其代表性，連續監測時間水田一期稻作為期(約 120-150 天)。

B. 樣品檢測前處理

將回收之樹脂包樣品送回實驗室後，先以去離子水清洗，去除表面附著之雜質及髒污，再經自然風乾或機械烘乾。將每一烘乾後的樹脂包樣品以固定大小夾鏈袋獨立編碼、包裝、放置並將樹脂充分混合均勻，待 X 射線螢光分析儀 (XRF) 篩測其金屬元素含量。

C. 樣品檢測

本研究專案於 X-射線螢光光譜儀分析時同步分析兩種空白樣品：儀器空白和方法空白，儀器空白是用來確認光譜儀或探針的端視窗是否有被污染，方法空白是用來監測實驗室是否受污染或干擾。利用 XRF 廠商提供的機台確認片，測試 XRF 機台的狀況穩定與否後，再進行樹脂包的檢測，由確認片可排除機台影響數據的可能性。檢測時選擇樹脂模式（設定為 3 個 Beam 各 180 秒）來篩測其重金屬含量。為確保 XRF 檢測樹脂時其數據的穩定性及再現性，使用空白樹脂標準品做單點不移動進行七次重複檢測，結果顯示檢測時機台穩定性良好，如表 4-7 所示。在這同時也做了樹脂樣品七次重複地拿取、均勻擾動的測試，其結果顯示樹脂的均勻性佳，不受人員拿取的擾動，而造成數據有太大的偏差表 4-8 和表 4-9。



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

表 4-8 XRF 空白樹脂標準品做單點不移動檢測結果

測試筆數	鋁量測值 (mg/kg)	鋅量測值 (mg/kg)	銅量測值 (mg/kg)	鈣量測值 (mg/kg)	標準值 (mg/kg)
1	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0
2	0.1	0.4	0.0	0.0	
3	0.1	0.4	0.0	0.0	
4	0.1	0.4	0.0	0.0	
5	0.1	0.4	0.0	0.0	
6	0.1	0.4	0.0	0.0	
7	0.1	0.4	0.0	0.0	
AVG	0.1	0.4	0.0	0.0	
SD	0.0	0.0	0.0	0.0	

表 4-9 XRF 濃度 2.0 (mg/kg) 標準樹脂重複地拿取、均勻擾動檢測結果

測試筆數	鋁量測值 (mg/kg)	鋅量測值 (mg/kg)	銅量測值 (mg/kg)	鈣量測值 (mg/kg)	標準值 (mg/kg)
1	2.0	2.0	2.1	2.0	2.0
2	2.0	2.1	2.1	2.0	
3	2.0	2.2	2.1	2.0	
4	2.0	2.1	2.1	2.0	
5	2.0	2.1	2.1	2.0	
6	2.0	2.1	2.1	2.0	
7	2.0	2.2	2.1	2.1	
AVG	2.0	2.1	2.1	2.0	
SD	0.0	0.1	0.0	0.0	

表 4-10 XRF 濃度 5.0 (mg/kg) 標準樹脂重複地拿取、均勻擾動檢測結果

測試筆數	鋁量測值 (mg/kg)	鋅量測值 (mg/kg)	銅量測值 (mg/kg)	鈣量測值 (mg/kg)	標準值 (mg/kg)
1	4.8	4.7	5.1	5.0	5.0
2	4.8	4.6	5.2	5.1	
3	5.0	4.8	5.2	5.1	
4	5.0	4.8	5.2	5.1	
5	5.0	4.8	5.2	5.1	
6	4.9	4.8	5.3	5.1	
7	4.8	4.7	5.1	5.1	
AVG	4.9	4.8	5.2	5.1	
SD	0.1	0.1	0.1	0.0	



本研究擬於 X-射線螢光光譜儀分析時同步分析兩種空白樣品：儀器空白和方法空白，儀器空白是用來確認光譜儀或探針的端視窗是否有被污染，方法空白是用來監測實驗室是否受污染或干擾。

使用校正確認查核樣品來檢查儀器的準確性和評估待測物分析時的穩定性和一致性，這個校正確認查核樣品應該在每個工作天開始分析前、真實樣品分析期間和每個工作天分析完成時皆需執行校正確認查核樣品分析。因為目前並無樹脂的標準品來執行校正確認查核，本研究團對自行製備樹脂標準品，可接受範圍為測量值在真值的相對誤差值 (RPD) 應在 $\pm 10\%$ ，假如測量值是落在這個範圍外，則查核樣品應重新分析。若測量值連續落在可接受範圍外，則儀器應該被重新校正。以低、中或高濃度待測物樣品之分析來測定方法之精密度，其檢測頻率最少每天應檢測一個精密度樣品，每個精密度樣品應該被重複分析 7 次。精密度檢測檢測時應選用各種不同濃度範圍之樣品，以便評估濃度對方法精密度之影響，精密度樣品檢測時之儀器分析時間應與現場分析時間相同。同一批次或 20 個樣品做一次重複分析，若同時有不同基質的樣品時，每種基質的樣品均需進行重複分析，相對差異百分比應小於 10% 。

D. 樣品保存方式

離子交換樹脂樣品應依據各檢測方法之規範要求保存，重金屬項目除了汞最長可保存 28 天外，其餘重金屬項目原則可在避光、通風及室溫下至少保存 6 個月上。

E. 採樣品管樣品

利用陰、陽離子交換樹脂採樣水田入滲水體的方式是係透過定點設置污染採樣器於水田土壤，連續監測水稻一期作耕種(約 120-150 天)並以 XRF 進行重金屬分析，由於污染採樣器係直接暴露於水田飽和土壤水入滲水體之環境介質中，且該污染採樣器及陰、陽離子交換樹脂皆為單次使用，每一樣品依照現場清洗及編號後，皆以固定大小夾鏈袋獨立編碼、包裝、放置，並無交叉污染之可能性。



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

本研究分析實驗室入滲水體的重金屬濃度利用感應耦合電漿-原子放射光譜 (Inductively Coupled Plasma with Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES, 型號 Thermo scientific iCAP 7000 series)將液體樣品經由霧化器霧化後，送入以高頻磁場感應所產生之高溫電漿，將霧化的待分析元素激發。由於被激發的元素由激發態回到基態時放出的光譜可由固態偵測儀分析，得到溶液中微量元素的定量分析。本研究試驗所需使用分析儀器與實驗藥品，其中儀器包含原子吸收光譜儀、感應耦合電漿-原子放射光譜與 X-射線螢光光譜儀；實驗藥品包含各類重金屬標準溶液(鋅、鉛、銅、鉻、鎳、鎘、鈣與鋇)、濃鹽酸、濃硝酸與濃硫酸等，分別如下表 4-11 與表 4-12 所示。

表 4-11 實驗分析儀器

實驗裝置	型號或廠牌
酸鹼度測定儀	pH vision 6071, JENCO
感應耦合電漿-原子放射光譜	Thermo scientific iCAP 7000 series
X-射線螢光光譜儀	手持式 OLYMPUS Vanta
雷射雕刻機	Laser engraving Machine (S7-20W)
自動定量分裝機	Automatic continuous quantitative filling machine(CJ-W225)

表 4-12 實驗藥品一覽表

藥品名稱	化學式	廠牌等級
濃鹽酸(Hydrochloric acid)	HCl	林純藥工業試藥級
濃硝酸(Nitric)	HNO ₃	SIGMA 分析級
鋅標準溶液(Zinc standard solution)	Zn	SIGMA 分析級
鉛標準溶液(Lead standard solution)	Pb	SIGMA 分析級
銅標準溶液(Copper standard solution)	Cu	SIGMA 分析級
鉻標準溶液(Chromium standard solution)	Cr	SIGMA 分析級
鎳標準溶液(Nickel standard solution)	Ni	SIGMA 分析級
鈣標準溶液(Calcium standard solution)	Ca	SIGMA 分析級
鈉標準溶液(Sodium standard solution)	Na	SIGMA 分析級



研究方法與過程

表 4-13 手持式 XRF(OLYMPUS Vanta)離子交換樹脂重金屬濃度檢測極限一覽表

項目	金屬種類	Pb	Cr	Zn	Cu	Ni	Cd	Ca	Sr
檢測極限 MDL(mg/kg)		1.1	2.0	2.0	1.0	2.0	2.1	162	4.8



圖 4-16 輻射操作人員結訓證書



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

4.7 工作進度甘特圖

表 4-14 工作進度甘特圖

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備 註
文獻蒐集(樹脂材料與分析方法)													
「智慧污染監測系統裝置」之研發設計(材質與包覆材選用)													
實驗室試驗設計與執行													
離子交換樹脂、包覆材與裝填方式之適用性討論													
文獻蒐集(現地水文環境與水田現況資料)													
水田監測位置與佈設數量規劃													
水田現地試驗執行(監測採樣器投放與回收)													
樣本前處理、儀器檢測													
建立監測數據之解讀方式、評估預警系統之可行性與適用性													
期中報告撰寫修正													
期末報告撰寫修正													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	15%	25%	35%	45%	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%	100%	
預定查核點	期中		(1) 實驗室「智慧污染監測系統裝置」之設計、材質與包覆材選定。 (2) 水田監測坵塊確認與佈設數量。 (3) 期中報告完成與繳交。										
	期末		(1)完成本專案實驗室與水田污染監測的檢測數據資料與彙整分析作業。 (2)建立監測數據之解讀方式、評估預警系統之可行性與適用性。 (3)期末報告完成與繳交。										



研究方法與過程

說明：

- 1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。
- 2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1)工作天數，(2)經費之分配，(3)工作量之比重，(4)擬達成目標之具體數字。
- 3、「預定查核點」，請在條形圖上標明符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。
- 4、以 12 個月作規劃，其中期中報告書提送要件需達計畫執行進度 50% 以上，期末報告書需於計畫結束前 1.5 個月提送。

表 4-15 本專案核心技術之技術成熟度等級一覽表

項次	核心技術名稱	TRL 評估			核心技術及 TRL 判定之說明
		計畫團隊現有技術之 TRL	國內外相似技術之 TRL(最高)	團隊預定達成目標之 TRL	
1	水田土壤飽和入滲重金屬通量智慧污染監測裝置	3	8(適用地下水通量與水井延時採樣技術)	6	本技術於國外已發展在評估地下水流量與水井延時採樣等領域但尚未在國內進行飽和水田土壤的重金屬通量評估試驗，本團隊延續前期研發之縮時樹脂膠囊監測重金屬污染技術能量，期能進一步透過實驗室試驗與現地研發之技術測試及試驗，達到水田土壤飽和入滲重金屬通量智慧污染監測裝置的技術研發。
	以下空白				

說明：

- 1、TRL 為技術在開發週期中成熟度之指標，可分為 9 個階段。
- 2、項次如不敷使用，請自行往下增列。
- 3、若計畫屬先導型、政策、評估類主題得免填。



五、結果與討論

5.1 「智慧污染監測系統裝置」滲漏實驗

本研究專案實驗室試驗是在台大水工試驗所利用自行研發設計之滲漏計通量率定進行試驗，內容包含離子交換樹脂重金屬濃度 XRF 檢量線建置、入滲通量監測裝置設計(如圖 4-13 所示)、滲漏計通量率定(鈣與鋁)、重金屬滲漏量率定(銅與鋅)以及評估重金屬入滲通量模式。灌溉水中的鈣濃度高(環境水體介於 50~80 mg/L)，可以作為入滲通量的參考依據，然其變化容易受到農民施肥產生改變；而環境中金屬鋁相對來講是穩定的(約為 1.0 mg/L)，雖然受限於地質條件濃度偏低是唯一缺點。因此，本試驗把鈣與鋁當作是入滲通量的參考依據，作為農地現地監控時互相參照的因子，屏除農民田間操作所帶來的干擾。滲漏試驗水體金屬濃度設計係統一採用 ICP 標準溶液添加作為配置濃度用，水體重金屬濃度設計分別為 0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L，包含金屬種類計有 20 種。受限於手持式 XRF 檢測金屬種類的限制以及檢量線的建置結果，最後可以進行滲漏率定的金屬計有 11 種，分別為 Ca、Cd、Cr、Cu、Fe、K、Mn、Ni、Pb、Sr 以及 Zn 等；滲漏體積設計分別為 4 L、6 L、8 L、10 L、12 L、16 L 與 20 L 等 7 種，端視配置金屬濃度高低決定對應之滲漏體積多寡，原則是金屬低濃度(例如 0.045 mg/L)的滲漏體積可以達到 20 L，而金屬高濃度(例如 0.727 mg/L)的滲漏體積則為 10 L。

茲就滲漏試驗水體金屬濃度 0.045 mg/L 以及滲漏體積分別為 4 L、6 L、8 L、12 L、16 L 與 20 L 等 6 種的條件下，所得檢測分析數據分別討論如下：

- (1) 重金屬鎘跟鎳在低濃度滲漏試驗中的樹脂吸附濃度全部低於手持式 XRF 的偵測極限，而重金屬鉛的滲漏體積大於 6 L 才能檢測出濃度值，可能是因為上述金屬容易被土壤顆粒吸附，所以在土壤中移動性較差導致，如表 5-1 所示。
- (2) 在其餘金屬檢測數據資料中顯示，透過統計的相關係數分析得知，8 種金屬的濃度相關係數皆達 0.95 以上，說明即便在低濃度金屬的滲漏試驗中，選用適合的離子交換樹脂(氫型)可以有效地得知滲漏水中水體通量變化趨勢的影響，如表 5-2 所示。
- (3) 分析鈣與鋁、銅與鋁、鋅與鋁以及鉻與鋁的濃度線性關係中，發現除了鈣與鋁線性關係較不受低滲漏量的影響外，其餘三種本研究案關心的重金屬(鋅、銅與鉻)因低滲漏量(例如 4 L 滲漏量)，



結果與討論

使得線性截距值偏大而無法通過原點的現象發生，分別如圖 5-2、圖 5-3 與圖 5-4 所示。

- (4) 金屬鈣與鋁在相同滲漏量的條件下(以 4 L 滲漏量為例)，不同濃度(0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L)所對應的線性關係高(達 $R^2=0.9812$)，說明氫型離子交換樹脂可以有效地得知滲漏水中金屬濃度變化的趨勢，如圖 5-5 所示。
- (5) 手持式 XRF 因為輻射能量偏低，對於離子交換樹脂所吸附的金屬濃度檢測有其侷限性，建議透過 QA/QC 的驗證提出偵測極限的建議值。

表 5-1 「智慧污染監測系統裝置」金屬濃度(0.045 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表

編號	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	滲漏體積(L)
A001	735	ND	0.9	0.3	125	387	8.6	ND	ND	11.4	1.4	4
A002	685	ND	1.9	0.6	237	315	11.9	ND	ND	10.8	1.3	4
A003	655	ND	1.5	0.5	155	357	7.8	ND	ND	9.9	1.2	4
A004	2,234	ND	3.8	1.1	608	857	24.5	ND	ND	24.5	2.3	6
A005	1,954	ND	3.1	0.9	622	758	24.6	ND	0.6	22.7	2.1	6
A006	2,457	ND	3.6	1.2	602	987	21.6	ND	0.6	29.7	2.6	6
A007	4,884	ND	5.7	2.3	1,275	1,676	38.7	ND	1.0	58.1	4.6	8
A008	5,247	ND	6.3	2.2	1,443	1,874	37.9	ND	1.2	66.8	4.4	8
A009	4,214	ND	5.6	2.3	1,119	1,741	34.8	ND	0.9	52.7	4.2	8
A010	5,129	ND	5.8	2.1	1,247	1,749	34.3	ND	1.0	56.0	4.3	8
A011	7,451	ND	7.5	2.9	2,167	2,784	47.4	ND	1.6	107.7	6.8	12
A012	7,701	ND	7.6	3.1	2,017	2,985	49.2	ND	1.5	115.2	7.4	12
A013	7,334	ND	7.3	3.3	2,054	2,777	48.9	ND	1.6	111.0	6.9	12
A014	8,398	ND	7.1	3.2	1,988	2,939	50.2	ND	1.7	108.9	6.8	12
A015	8,951	ND	8.4	3.4	2,628	3,385	55.6	ND	1.7	131.0	7.2	16
A016	9,024	ND	8.6	3.6	2,544	3,771	58.7	ND	1.8	139.3	7.8	16
A017	9,854	ND	8.9	3.8	2,688	3,679	57.9	ND	1.8	144.8	7.6	16
A018	9,814	ND	8.4	3.7	2,693	3,568	56.2	ND	1.8	136.0	7.6	16
A019	11,064	ND	10.2	4.3	3,347	4,374	69.4	ND	2.4	166.2	8.4	20
A020	10,606	ND	9.8	4.0	3,241	4,374	68.4	ND	2.4	162.7	9.2	20
A021	11,471	ND	9.9	4.3	3,179	4,232	66.4	ND	2.3	165.4	8.6	20
A022	11,081	ND	9.6	4.1	3,248	4,217	66.6	ND	2.2	162.3	8.2	20



結果與討論

表 5-2 「智慧污染監測系統裝置」重金屬(0.045 mg/L)滲漏實驗相關係數一覽表

	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
Ca	1.00										
Cd	-	1.00									
Cr	0.98	-	1.00								
Cu	0.99	-	0.99	1.00							
Fe	0.99	-	0.98	0.98	1.00						
K	0.99	-	0.98	0.99	0.99	1.00					
Mn	0.99	-	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00				
Ni	-	-	-	-	-	-	-	1.00			
Pb	0.98	-	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	-	1.00		
Sr	0.99	-	0.97	0.98	0.99	0.97	0.98	-	0.98	1.00	
Zn	0.99	-	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	-	0.98	0.99	1.00

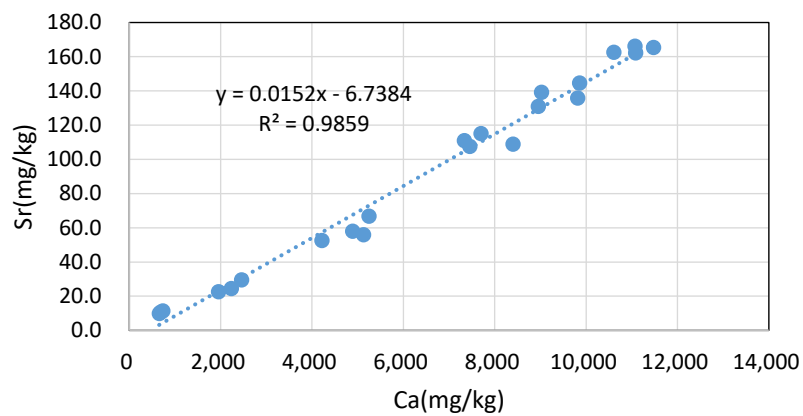


圖 5-1 重金屬鈣與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖

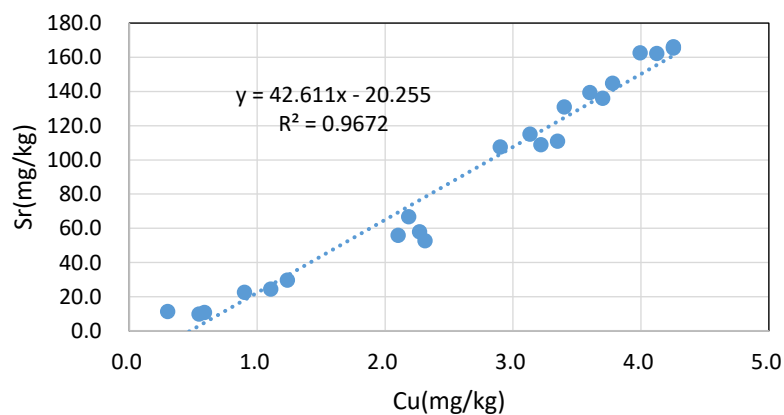


圖 5-2 重金屬銅與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

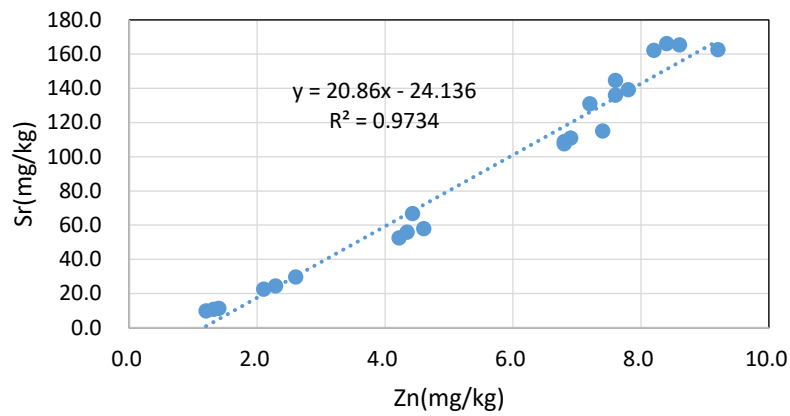


圖 5-3 重金屬鋅與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖

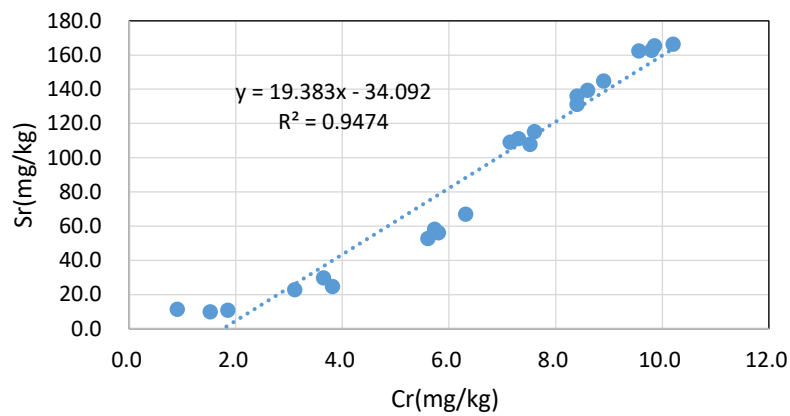


圖 5-4 重金屬鉻與鋇(0.045 mg/L)滲漏實驗關係圖

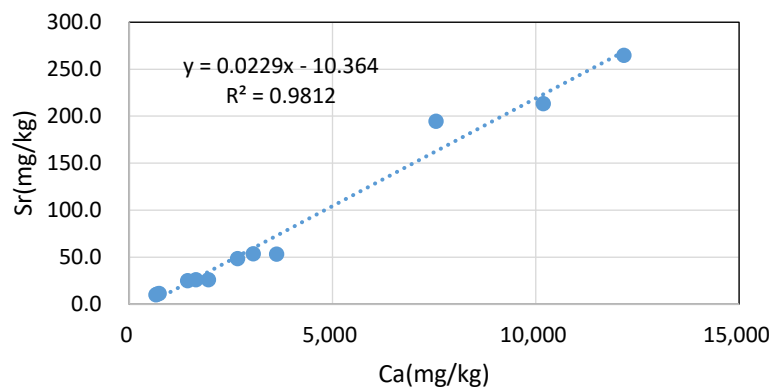


圖 5-5 重金屬鈣與鋇(滲漏體積 4 L)滲漏實驗關係圖



結果與討論

茲就滲漏試驗水體金屬濃度 0.091 mg/L 以及滲漏體積分別為 4 L、6 L、8 L、12 L、16 L 與 20 L 等 6 種的條件下，所得檢測分析數據分別討論如下：

- (1) 重金屬鎘跟鎳在低濃度滲漏試驗中的樹脂吸附濃度部分低於手持式 XRF 的偵測極限，而重金屬鉛雖然能檢測出濃度值，但是數據偏低。隨著滲漏水體的濃度增加，發生在滲漏水金屬因濃度過低導致鎘跟鎳金屬容易被土壤顆粒吸附，產生檢測數據偏低的現象獲得些微改善，如表 5-3 所示。
- (2) 在其餘金屬檢測數據資料中顯示，透過統計的相關係數分析得知，9 種金屬的濃度相關係數皆達 0.95 以上，說明即便在低濃度金屬的滲漏試驗中，選用適合的離子交換樹脂(氫型)可以有效地得知滲漏水中水體通量變化趨勢的影響，如表 5-4 所示。
- (3) 分析鈣與鋇、銅與鋇、鋅與鋇以及鉻與鋇的濃度線性關係中，隨著滲漏水體的濃度增加，發現鈣與鋇以及銅與鋇的濃度線性關係已較不受低滲漏量的影響(如圖 5-6 與圖 5-7 所示)；其餘二種本研究案關心的重金屬(鋅與鉻)因低滲漏量(例如 4 L 滲漏量)，使得線性截距值偏大而無法通過原點的現象發生，分別如圖 5-8 與圖 5-9 所示。
- (4) 金屬鈣與鋇在相同滲漏量的條件下(以 6 L 滲漏量為例)，不同濃度(0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L)所對應的線性關係高(達 $R^2=0.9912$)，說明氫型離子交換樹脂可以有效地得知滲漏水中金屬濃度變化的趨勢，如圖 5-10 所示。

表 5-3 「智慧污染監測系統裝置」金屬濃度(0.091 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表

編號	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	滲漏體積(L)
C001	1,433	ND	3.8	1.1	235	451	18.4	ND	0.2	24.9	2.3	4
C002	1,636	ND	4.2	0.9	454	583	26.3	ND	0.6	26.2	2.9	4
C003	1,943	ND	3.4	0.8	186	662	36.0	ND	0.5	26.1	3.6	4
C004	3,301	ND	8.9	2.1	1,182	2,019	55.8	ND	1.2	40.6	5.2	6
C005	2,928	ND	11.0	2.2	1,085	1,987	66.3	ND	1.3	52.1	6.2	6
C006	3,593	ND	8.5	2.4	1,171	2,115	41.9	ND	1.5	46.0	4.4	6
C007	11,715	ND	13.5	4.8	2,489	3,155	98.4	ND	2.8	137.0	9.3	8
C008	14,688	ND	14.9	4.6	2,819	4,413	121.0	ND	2.8	158.0	10.3	8
C009	9,110	ND	17.1	4.9	2,183	3,723	72.6	ND	2.1	124.0	9.8	8
C010	12,302	ND	15.1	5.3	3,115	3,292	78.6	ND	2.3	132.0	10.1	8
C011	16,547	ND	17.8	7.3	4,238	4,574	124.2	0.2	3.1	256.0	12.3	12
C012	18,474	ND	16.4	6.8	4,526	4,627	127.9	0.4	3.2	274.0	13.4	12
C013	16,574	ND	15.7	7.3	4,017	5,047	112.7	0.3	3.6	264.0	13.2	12
C014	20,147	ND	16.9	7.0	3,887	5,541	126.8	ND	3.0	259.0	12.7	12
C015	21,474	ND	18.6	8.6	5,142	6,214	147.8	0.6	3.9	312.0	15.4	16
C016	22,458	ND	19.2	8.4	4,895	7,114	140.3	0.8	4.1	332.0	14.8	16
C017	24,587	0.2	18.4	8.3	4,924	6,578	133.9	1.0	3.8	345.0	13.8	16
C018	23,547	ND	17.8	8.6	5,269	6,254	129.8	0.5	3.6	324.0	14.6	16
C019	26,547	0.4	20.3	9.4	7,148	8,254	144.8	1.3	4.1	417.0	17.2	20
C020	25,447	0.3	21.8	8.8	6,985	8,254	140.7	1.6	4.2	408.0	17.6	20
C021	29,478	0.4	23.4	9.4	6,547	7,985	143.6	1.8	4.0	411.0	16.7	20
C022	26,587	0.5	22.7	9.1	6,357	8,547	154.2	0.9	3.9	387.0	16.2	20



結果與討論

表 5-4 「智慧污染監測系統裝置」重金屬(0.091 mg/L)滲漏實驗相關係數一覽表

	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
Ca	1.00										
Cd	0.65	1.00									
Cr	0.93	0.60	1.00								
Cu	0.98	0.57	0.95	1.00							
Fe	0.98	0.69	0.94	0.97	1.00						
K	0.98	0.70	0.95	0.97	0.98	1.00					
Mn	0.96	0.52	0.94	0.96	0.93	0.94	1.00				
Ni	0.81	0.82	0.72	0.76	0.85	0.83	0.69	1.00			
Pb	0.96	0.52	0.95	0.98	0.95	0.95	0.97	0.73	1.00		
Sr	0.99	0.67	0.92	0.98	0.99	0.98	0.94	0.85	0.95	1.00	
Zn	0.97	0.59	0.96	0.99	0.98	0.97	0.97	0.77	0.98	0.97	1.00

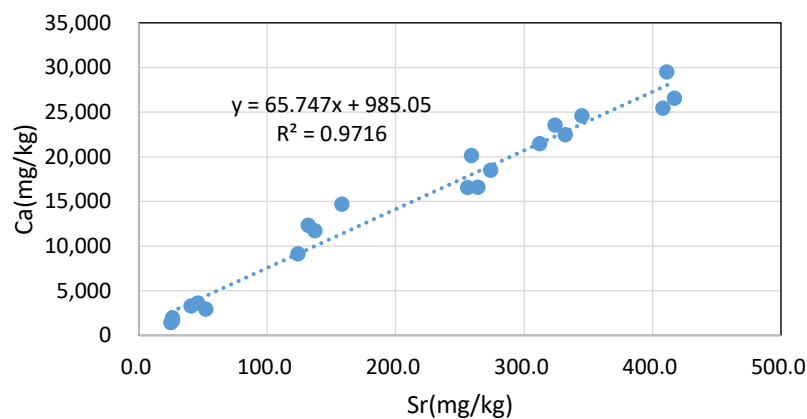


圖 5-6 重金屬鈣與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖

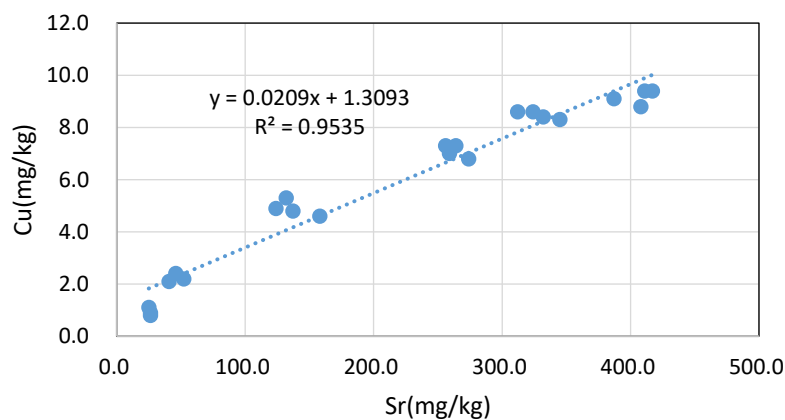


圖 5-7 重金屬銅與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

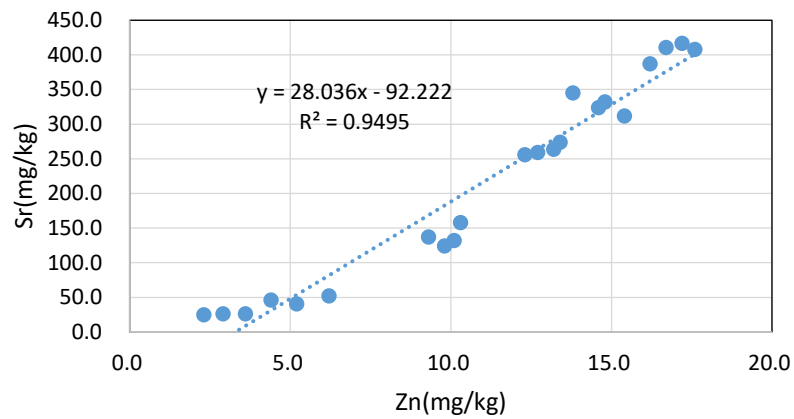


圖 5-8 重金屬鋅與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖

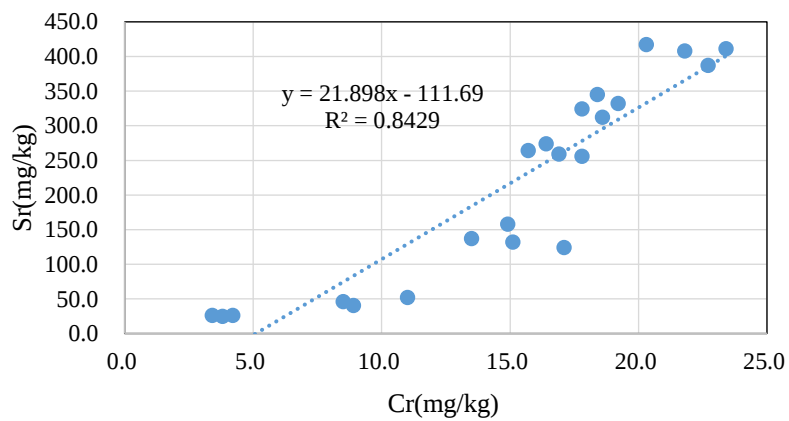


圖 5-9 重金屬鉻與鋇(0.091 mg/L)滲漏實驗關係圖

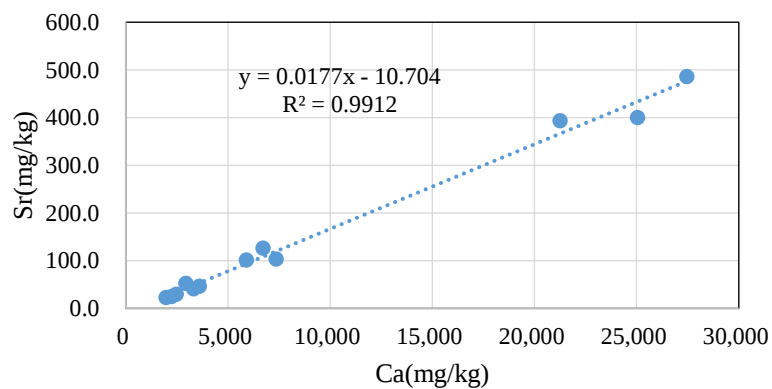


圖 5-10 重金屬鈣與鋇(滲漏體積 6L)滲漏實驗關係圖



結果與討論

茲就滲漏試驗水體金屬濃度 0.182 mg/L 以及滲漏體積分別為 4 L、6 L、8 L、10 L 與 16 L 等 5 種的條件下，所得檢測分析數據分別討論如下：

- (1) 重金屬鎘跟鎳在低濃度滲漏試驗中的樹脂吸附濃度部分低於手持式 XRF 的偵測極限，而重金屬鉛雖然能檢測出濃度值，但是數據偏低。隨著滲漏水體的濃度增加，發生在滲漏水金屬因濃度過低導致鎘跟鎳金屬容易被土壤顆粒吸附，產生檢測數據偏低的現象持續獲得改善，如表 5-5 所示。
- (2) 在其餘金屬檢測數據資料中顯示，透過統計的相關係數分析得知，9 種金屬的濃度相關係數皆達 0.95 以上，說明即便在低濃度金屬的滲漏試驗中，選用適合的離子交換樹脂(氫型)可以有效地得知滲漏水中水體通量變化趨勢的影響，如表 5-6 所示。
- (3) 分析鈣與鋁、銅與鋁、鋅與鋁以及鉻與鋁的濃度線性關係中，隨著滲漏水體的濃度增加，發現鈣與鋁以及銅與鋁的濃度線性關係已較不受低滲漏量的影響(如圖 5-11 與圖 5-12 所示)；其餘二種本研究案關心的重金屬(鋅與鉻)因低滲漏量(例如 4 L 滲漏量)，使得線性截距值偏大而無法通過原點的現象發生，分別如圖 5-13 與圖 5-14 所示。
- (4) 金屬鈣與鋁在相同滲漏量的條件下(以 8 L 滲漏量為例)，不同濃度(0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L)所對應的線性關係高(達 $R^2=0.9885$)，說明氫型離子交換樹脂可以有效地得知滲漏水中金屬濃度變化的趨勢，如圖 5-15 所示。

表 5-5 「智慧污染監測系統裝置」金屬濃度(0.182 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表

編號	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	滲漏體積(L)
D001	2,667	ND	5.3	1.6	587	1,457	35.5	ND	0.7	48.6	9.6	4
D002	3,046	ND	9.1	1.9	784	1,146	49.2	ND	1.2	53.6	8.7	4
D003	3,620	ND	7.6	1.7	514	1,299	45.3	ND	1.1	53.4	10.1	4
D004	5,898	ND	17.9	3.8	1,547	3,918	100.2	ND	2.1	101.6	13.2	6
D005	7,354	ND	20.4	4.1	2,052	4,258	118.4	ND	2.5	103.6	15.2	6
D006	6,706	ND	18.3	5.2	2,213	4,103	109.6	ND	2.9	126.4	15.7	6
D007	23,894	ND	26.4	7.8	4,677	6,110	173.9	0.2	5.0	267.4	21.3	8
D008	25,454	ND	29.0	8.8	5,295	7,547	213.0	0.4	5.3	307.9	23.3	8
D009	19,241	ND	28.6	7.6	5,105	7,206	129.3	0.3	4.2	242.3	20.4	8
D010	21,009	ND	29.4	9.4	5,848	6,689	139.7	0.4	4.8	289.3	22.9	8
D011	26,415	ND	34.4	12.3	7,948	8,549	218.6	0.6	5.9	455.4	30.4	10
D012	27,854	ND	31.8	12.0	8,487	8,951	225.0	0.7	6.1	471.5	29.4	10
D013	28,654	ND	30.5	12.9	7,535	9,762	198.7	1.0	6.3	415.7	29.0	10
D014	26,547	0.2	32.7	10.4	8,257	9,547	223.1	1.2	6.4	427.8	31.2	10
D015	40,143	0.3	35.9	15.6	9,639	11,247	259.4	1.8	7.1	605.2	33.3	16
D016	41,983	0.2	37.0	14.7	9,177	12,479	246.4	2.4	7.4	622.3	32.2	16
D017	45,965	0.5	35.5	14.6	10,231	12,717	235.3	2.2	7.6	756.3	35.7	16
D018	44,020	0.4	34.4	13.9	9,876	12,091	228.3	1.9	7.1	685.4	33.4	16



結果與討論

表 5-6 「智慧污染監測系統裝置」重金屬(0.182 mg/L)滲漏實驗相關係數一覽表

	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
Ca	1.00										
Cd	0.76	1.00									
Cr	0.91	0.54	1.00								
Cu	0.96	0.65	0.95	1.00							
Fe	0.97	0.69	0.95	0.98	1.00						
K	0.98	0.72	0.95	0.98	0.98	1.00					
Mn	0.93	0.59	0.96	0.95	0.95	0.95	1.00				
Ni	0.92	0.87	0.76	0.87	0.87	0.90	0.80	1.00			
Pb	0.97	0.64	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.85	1.00		
Sr	0.98	0.80	0.89	0.96	0.97	0.97	0.91	0.94	0.95	1.00	
Zn	0.96	0.68	0.95	0.98	0.99	0.98	0.96	0.86	0.99	0.97	1.00

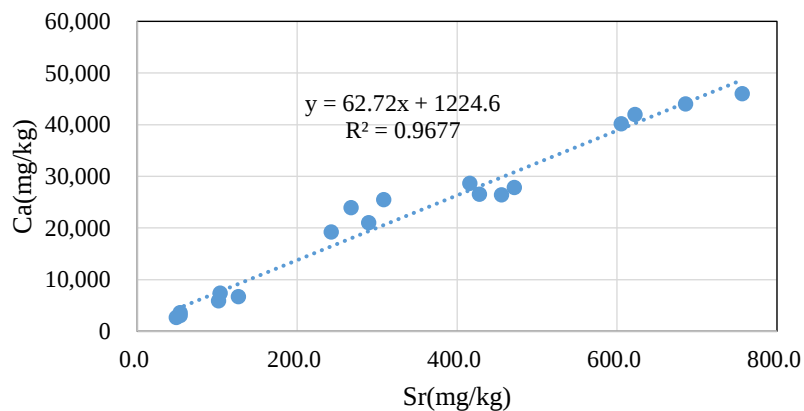


圖 5-11 重金屬鈣與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖

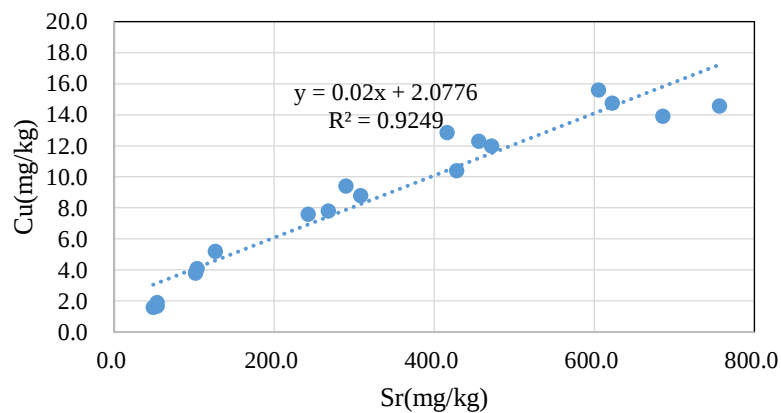


圖 5-12 重金屬銅與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

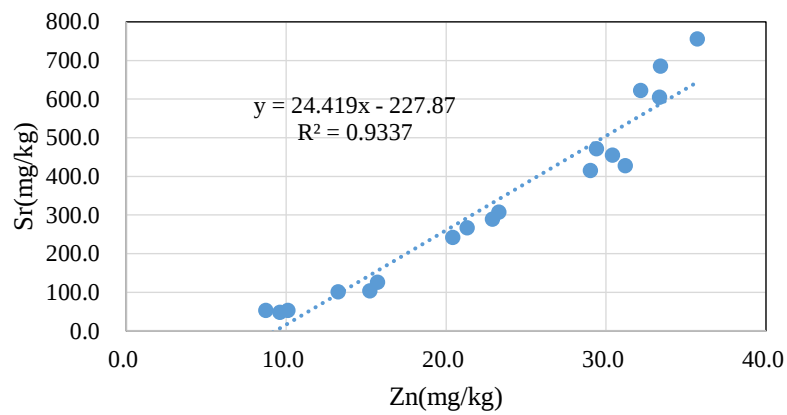


圖 5-13 重金屬鋅與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖

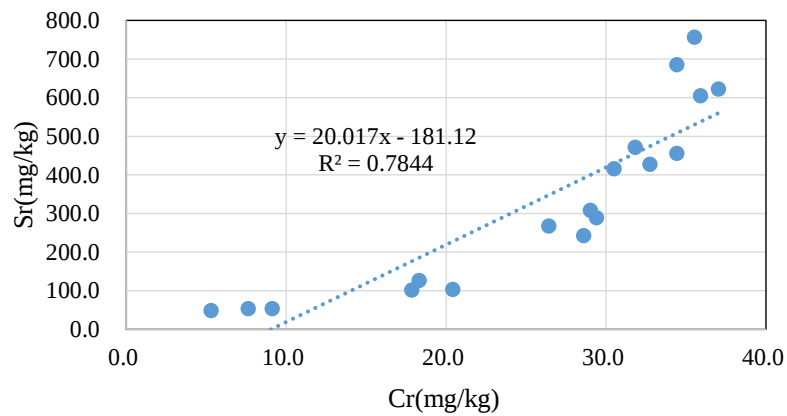


圖 5-14 重金屬鉻與鋇(0.182 mg/L)滲漏實驗關係圖

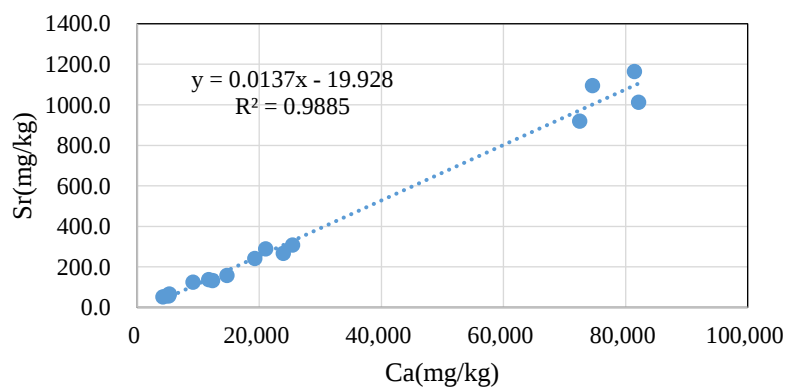


圖 5-15 重金屬鈣與鋇(滲漏體積 8L)滲漏實驗關係圖



結果與討論

茲就滲漏試驗水體金屬濃度 0.727 mg/L 以及滲漏體積分別為 4 L、6 L、8 L 與 10 L 等 4 種的條件下，所得檢測分析數據分別討論如下：

- (1) 重金屬鎘跟鎳在低濃度滲漏試驗中的樹脂吸附濃度已高出手持式 XRF 的偵測極限許多。隨著滲漏水體的濃度增加，發生在滲漏水金屬因低濃度導致鎘跟鎳金屬容易被土壤顆粒吸附的影響大幅降低，使得檢測數據偏低的現象已不復見，如表 5-7 所示。
- (2) 在金屬檢測數據資料中顯示，透過統計的相關係數分析得知，11 種金屬的濃度相關係數皆達 0.95 以上，說明即便在低濃度金屬的滲漏試驗中，選用適合的離子交換樹脂(氫型)可以有效地得知滲漏水中水體通量變化趨勢的影響，如表 5-8 所示。
- (3) 分析鈣與鋇、銅與鋇、鋅與鋇以及鉻與鋇的濃度線性關係中，隨著滲漏水體的濃度增加，發現鈣與鋇以及銅與鋇的濃度線性關係已較不受低滲漏量的影響(如圖 5-16 與圖 5-17 所示)；其餘二種本研究案關心的重金屬(鋅與鉻)因低滲漏量(例如 4 L 滲漏量)，使得線性截距值偏大而無法通過原點的現象發生，分別如圖 5-18 與圖 5-19 所示。
- (4) 金屬銅與鋇在相同滲漏量的條件下(以 8 L 滲漏量為例)，不同濃度(0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L)所對應的線性關係高(達 $R^2=0.9966$)，說明氫型離子交換樹脂可以有效地得知滲漏水中金屬濃度變化的趨勢，如圖 5-20 所示。

表 5-7 「智慧污染監測系統裝置」金屬濃度(0.727 mg/L)滲漏實驗檢測數據一覽表

編號	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	滲漏體積(L)
E001	7,541	ND	20.8	7.3	2,332	5,772	138.2	1.4	3.5	195	40.8	4
E002	10,183	ND	34.7	8.5	3,110	4,569	189.2	2.1	5.5	213	37.3	4
E003	12,163	ND	29.3	7.6	2,043	5,159	174.7	1.8	5.0	265	42.8	4
E004	21,254	ND	66.8	15.6	7,245	15,294	379.6	2.1	8.7	393	58.4	6
E005	25,044	ND	76.2	16.7	8,354	18,415	403.2	2.8	10.3	400	60.1	6
E006	27,451	0.2	68.5	16.7	8,017	16,011	414.5	3.2	11.7	486	65.0	6
E007	82,107	0.4	88.9	30.7	18,489	23,779	654.5	5.7	17.4	1,013	87.3	8
E008	81,457	0.5	89.6	34.5	17,845	26,547	621.3	6.3	18.6	1,165	99.6	8
E009	72,451	0.4	92.3	30.0	20,178	24,158	552.1	5.7	16.6	919	93.7	8
E010	74,568	0.7	95.6	33.4	21,474	26,019	526.7	6.4	18.8	1,095	92.4	8
E011	90,805	1.2	118.6	41.7	31,408	33,218	821.0	8.9	19.7	1,716	123.4	10
E012	95,769	1.4	118.0	39.7	33,535	34,774	844.8	9.3	19.6	1,557	119.4	10
E013	98,529	1.3	113.2	42.3	29,775	35,911	746.7	10.3	20.3	1,687	117.8	10
E014	93,547	1.7	121.4	40.5	32,628	33,214	837.7	10.1	20.4	1,613	126.6	10



結果與討論

表 5-8 「智慧污染監測系統裝置」重金屬(0.727 mg/L)滲漏實驗相關係數一覽表

	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
Ca	1.00										
Cd	0.87	1.00									
Cr	0.93	0.86	1.00								
Cu	0.99	0.89	0.96	1.00							
Fe	0.96	0.95	0.95	0.97	1.00						
K	0.96	0.88	0.98	0.98	0.97	1.00					
Mn	0.95	0.89	0.98	0.97	0.97	0.98	1.00				
Ni	0.96	0.97	0.93	0.97	0.98	0.95	0.95	1.00			
Pb	0.98	0.83	0.96	0.98	0.94	0.97	0.95	0.93	1.00		
Sr	0.97	0.94	0.93	0.98	0.98	0.96	0.96	0.99	0.94	1.00	
Zn	0.97	0.93	0.96	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.96	0.99	1.00

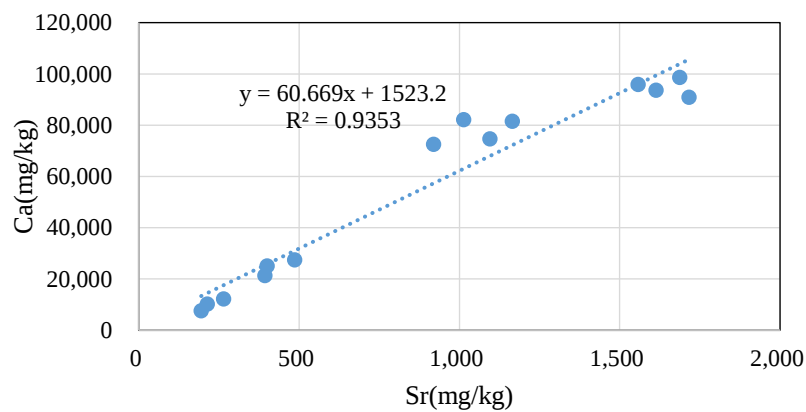


圖 5-16 重金屬鈣與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖

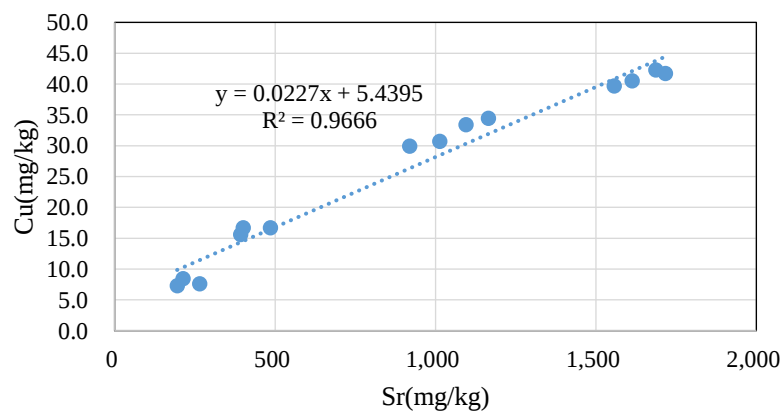


圖 5-17 重金屬銅與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

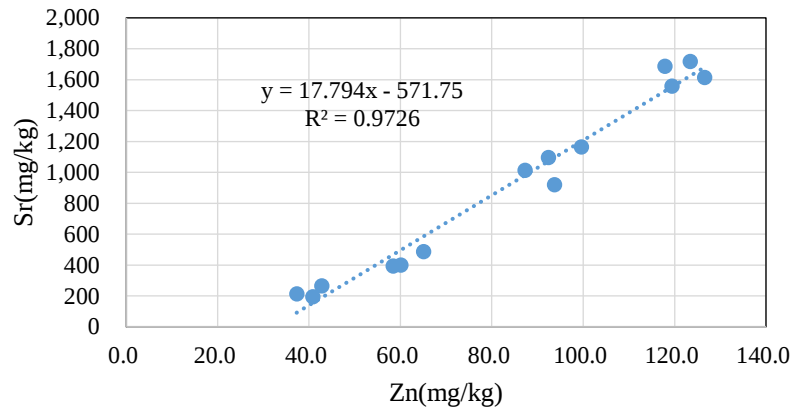


圖 5-18 重金屬鋅與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖

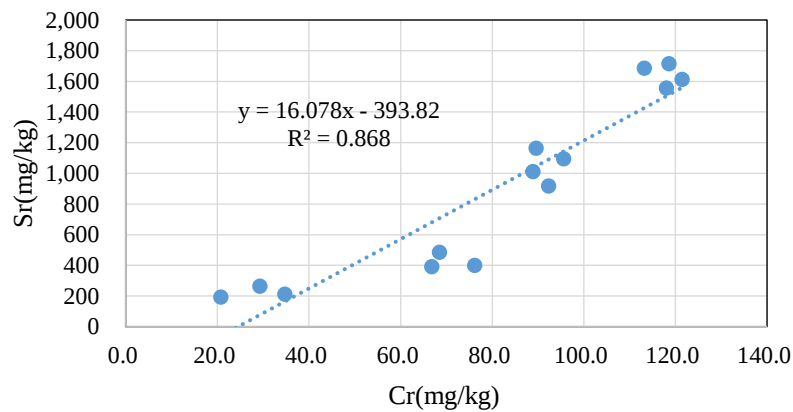


圖 5-19 重金屬鉻與鋇(0.727 mg/L)滲漏實驗關係圖

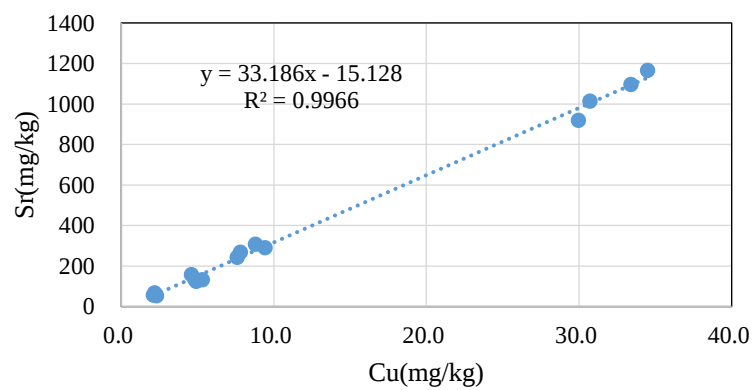


圖 5-20 重金屬銅與鋇(滲漏體積 8L)滲漏實驗關係圖



5.2 樹脂的重金屬濃度與 XRF 之關係

離子交換樹脂吸附重金屬的檢量線建置為一封閉系統，依據質量守恒原理，水體中重金屬濃度值的遞減現象，可轉換為陽離子交換樹脂的吸附重金屬的吸收率，以鋅為例，根據質量平衡計算陽離子交換樹脂的理論鋅濃度值。吸附完成之樹脂透過手持式 OLYMPUS Vanta 檢測分析可以得到各種重金屬所對應的峰值(如表 5-9 所示)，將上述兩者資料彙整後，以微量鋅濃度的吸附試驗結果如表 5.1 所示。

表 5-9 樹脂理論濃度與手持式 OLYMPUS Vanta 檢測值關係一覽表

項 目 \ 轉速(rpm)	50	100	150	200
OLYMPUS Vanta (cps)	1700	6867	7272	6209
樹脂理論濃度(mg kg ⁻¹)	18.62	74.20	76.52	66.84

將各自不同濃度的鋅納入比較後，發現不同鋅濃度的各自相關係數皆達 0.9 以上(如圖 5-21(a)至圖 5-21(d))，缺點是陽離子交換樹脂的理論鋅濃度值範圍不夠大，進一步所有不同鋅濃度的吸附試驗數值整合在一起。

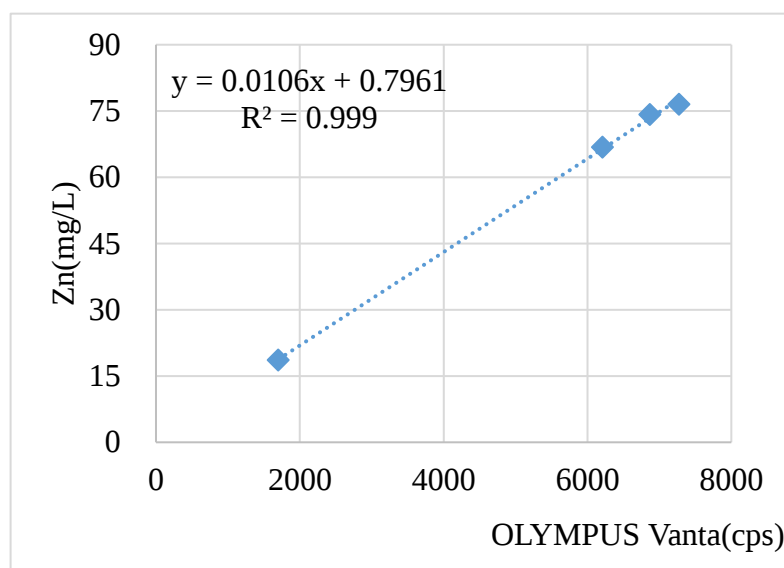


圖 5-21(a) 微量鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

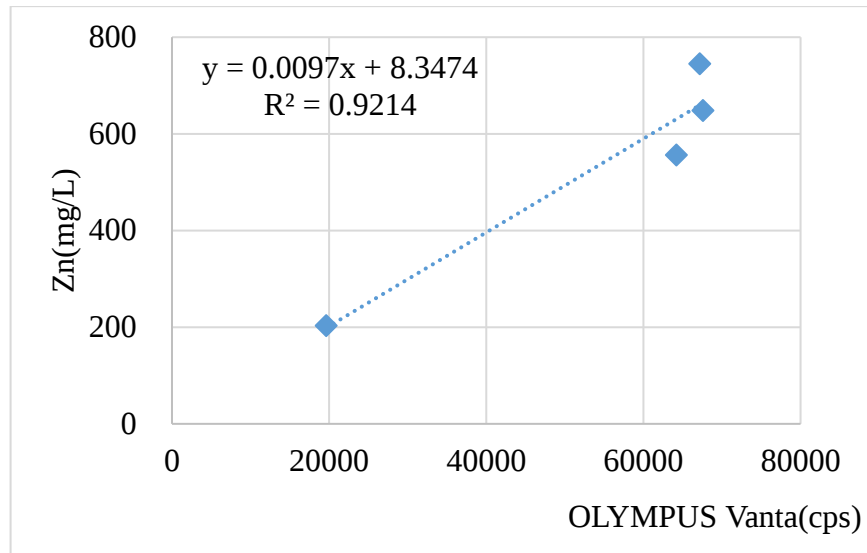


圖 5-21(b) 低濃度鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據

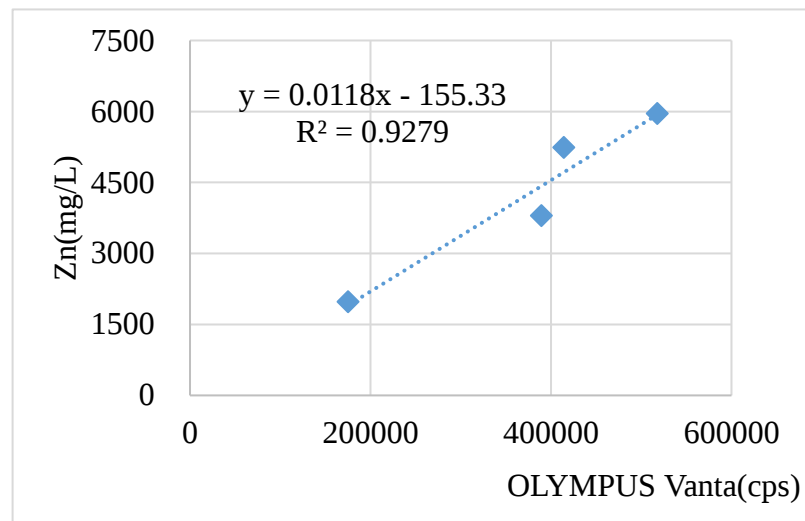


圖 5-21(c) 中濃度鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據



結果與討論

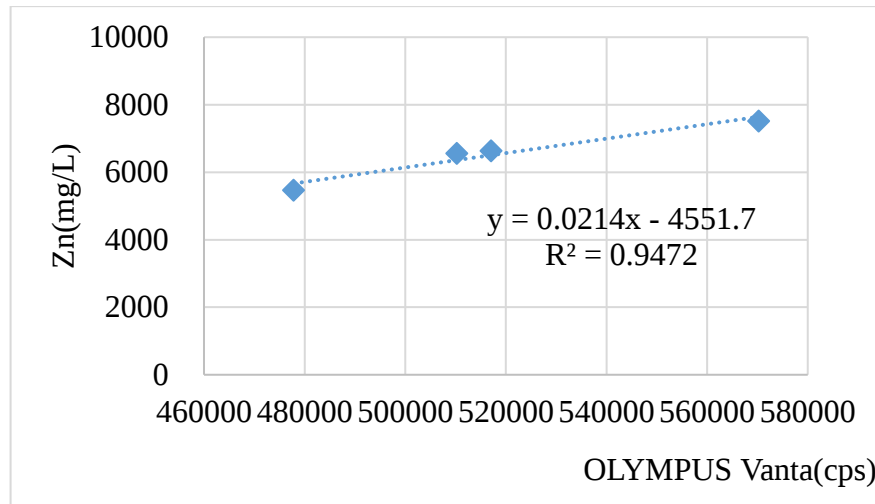


圖 5-21(d) 高濃度鋅對應 OLYMPUS Vanta 數據

表 5-10 實驗室樹脂吸附試驗 OLYMPUS Vanta 檢測分析結果一覽表

(單位:cps)

重金屬 編碼項目		Ca	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
實驗試編 碼	OLYMPUS Vanta 編碼								
CD1V1	C01	273	38	368	358	1,451	2,211	1,700	72
CD2V1	C02	1,996	258	1,640	2,205	3,626	10,569	19,622	2,191
CD3V1	C03	10,478	1,016	13,540	18,384	24,036	87,022	175,081	22,017
CD4V1	C04	37,819	1,705	36,749	39,602	49,631	177,624	372,605	51,573
CD1V2	C05	843	52	791	954	1,901	4,249	6,867	414
CD2V2	C06	6,182	779	4,186	5,977	8,432	27,370	64,197	6,587
CD3V2	C07	34,573	2,549	43,377	55,911	69,994	247,512	517,859	59,466
CD4V2	C08	47,116	1,364	71,966	63,526	75,899	266,333	517,036	83,504
CD1V3	C09	787	92	840	1,006	1,983	4,133	7,272	344
CD2V3	C10	6,132	776	3,911	5,738	7,972	26,597	67,177	6,221
CD3V3	C11	27,186	2,168	33,452	44,809	55,771	198,234	414,385	47,079
CD4V3	C12	55,145	1,433	94,334	67,556	78,248	267,725	570,240	94,278
CD1V4	C14	658	83	718	807	1,947	3,776	6,209	380
CD2V4	C15	7,235	924	4,876	6,956	9,929	34,291	67,598	7,649
CD3V4	C16	26,963	1,914	39,741	42,238	52,865	189,287	389,376	51,182
CD4V4	C17	40,684	1,397	61,046	57,157	70,286	244,658	510,227	73,226



結果與討論

合併後發現，陽離子交換樹脂的理論鋅濃度值範圍 $18.62 \sim 7518 \text{ mg kg}^{-1}$ ，且相關系數高達 0.9863(如圖 5-22 所示)，進一步將數據資料取以 10 為底的對數比較後，兩者相關系數更可提高至 0.9974(如圖 5-23 所示)。重複上述步驟，分別針對銅、鉻、鉛、鎳、鈣、錳與鈦做比較，結果分別如圖 5-24 至圖 5-30 所示(以 10 為底的對數)。

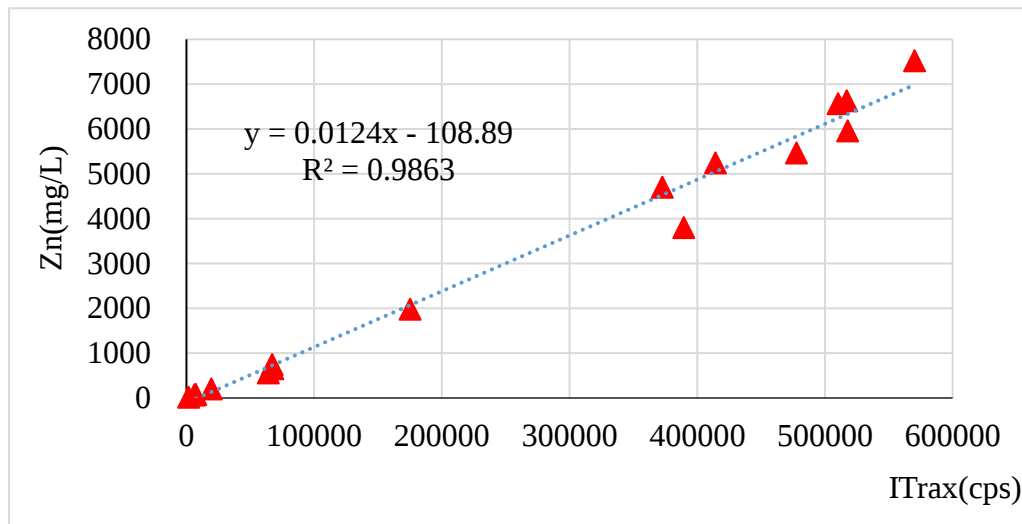


圖 5-22 含鋅的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據關係圖

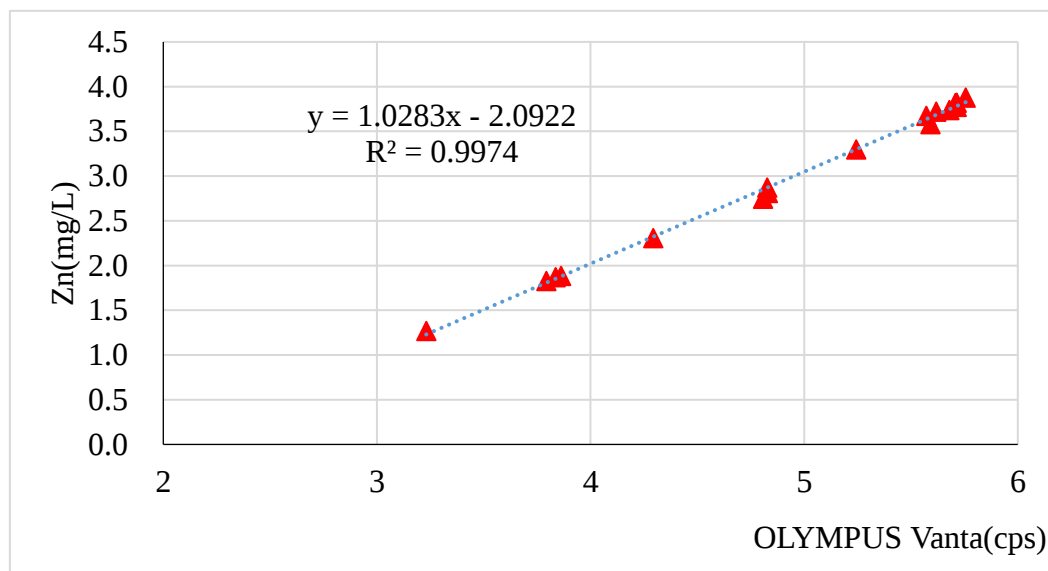


圖 5-23 含鋅的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

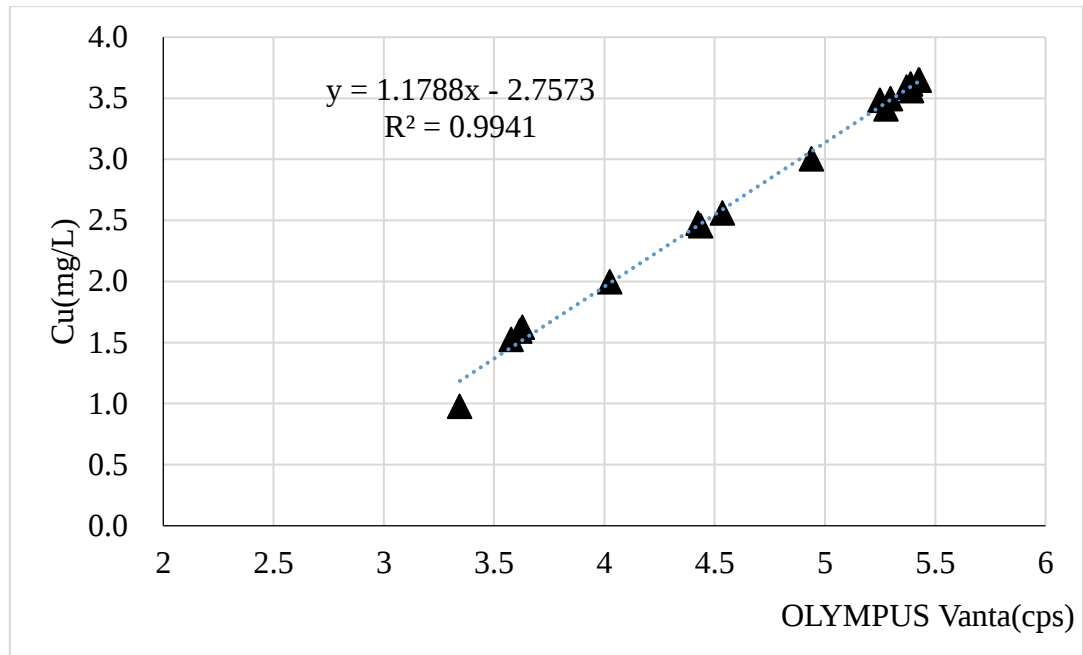


圖 5-24 含銅的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)

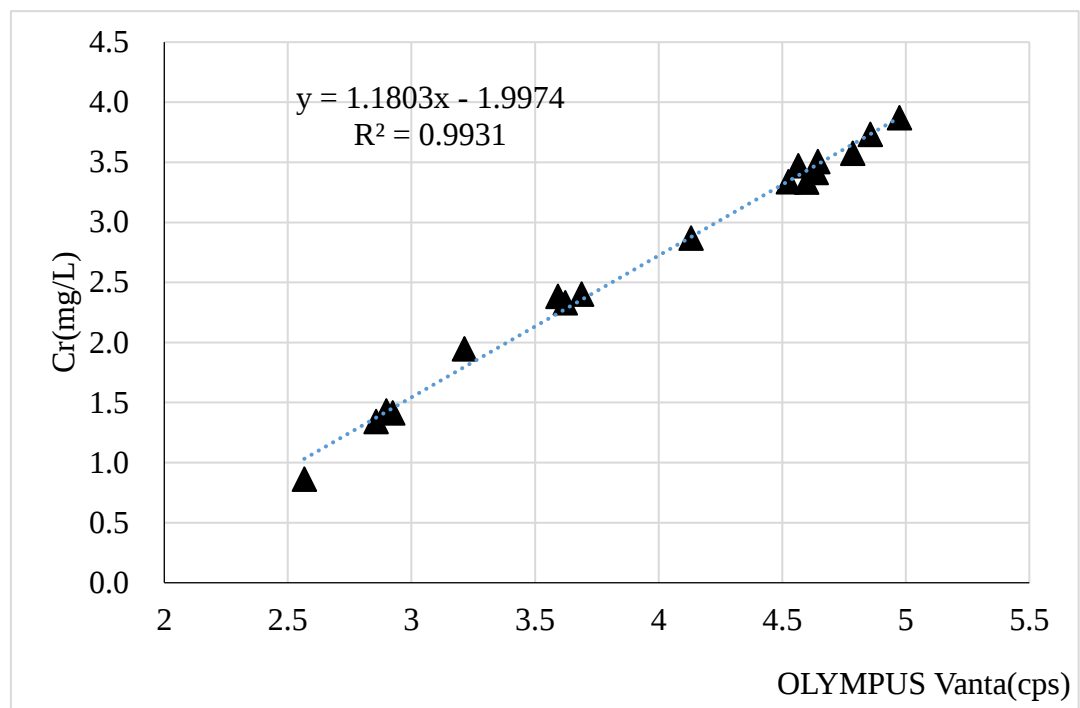


圖 5-25 含鉻的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)



結果與討論

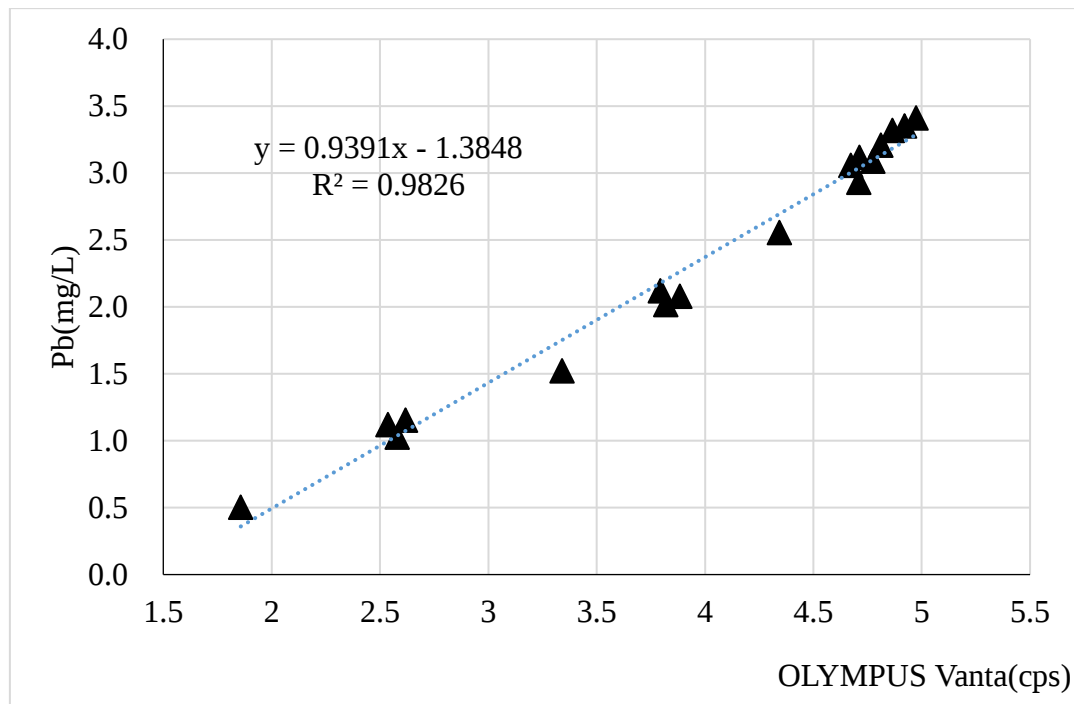


圖 5-26 含鉛的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)

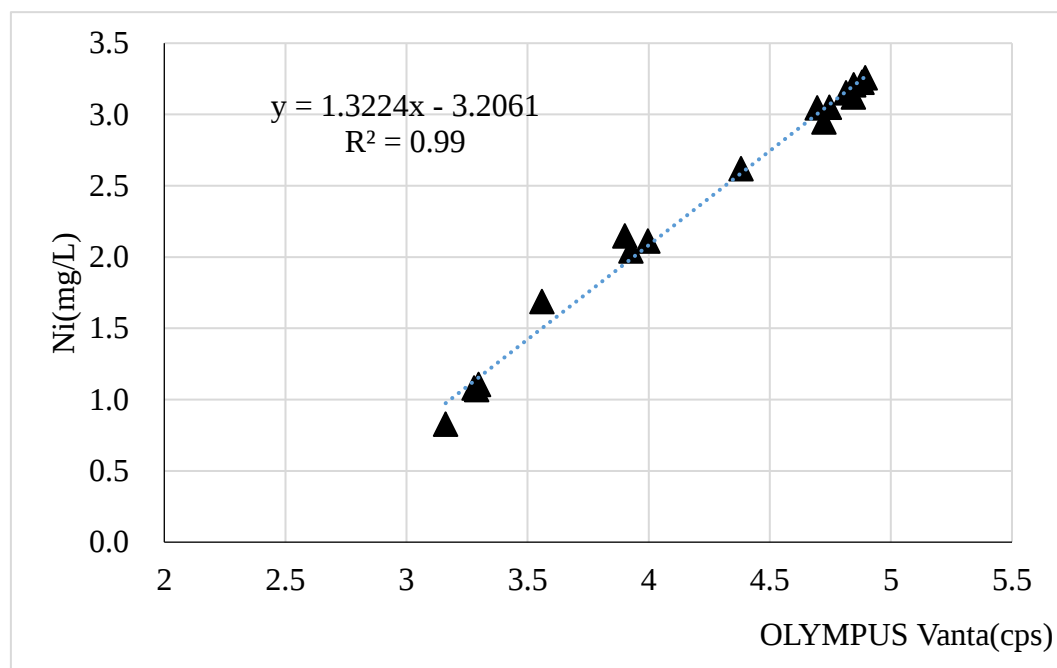


圖 5-27 含鎳的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

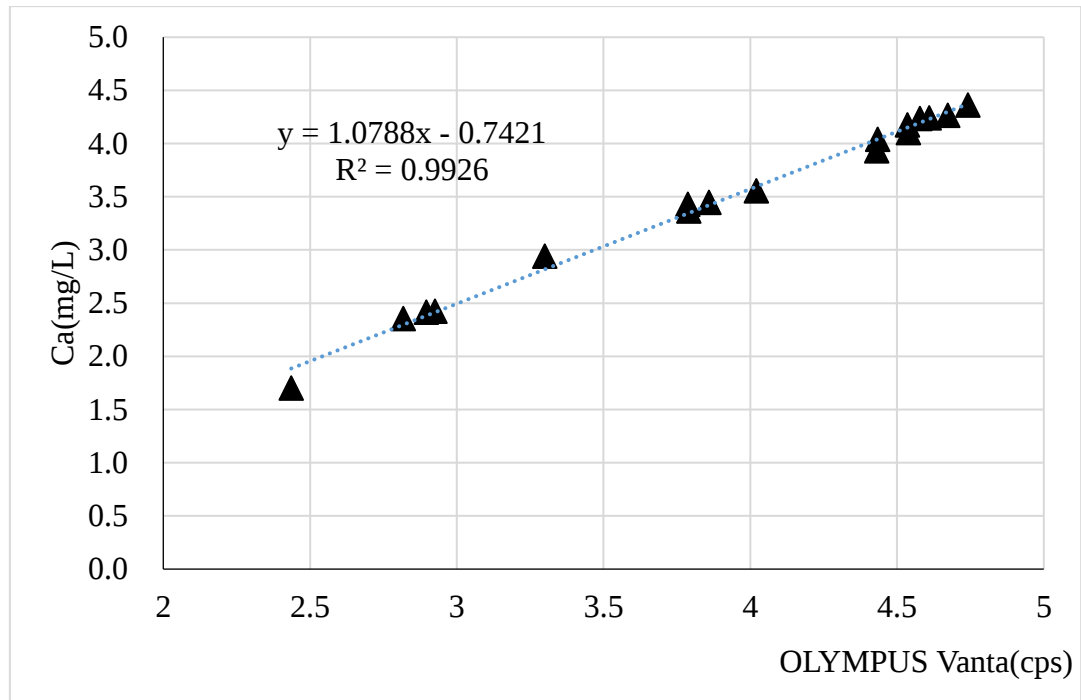


圖 5-28 含鈣的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)

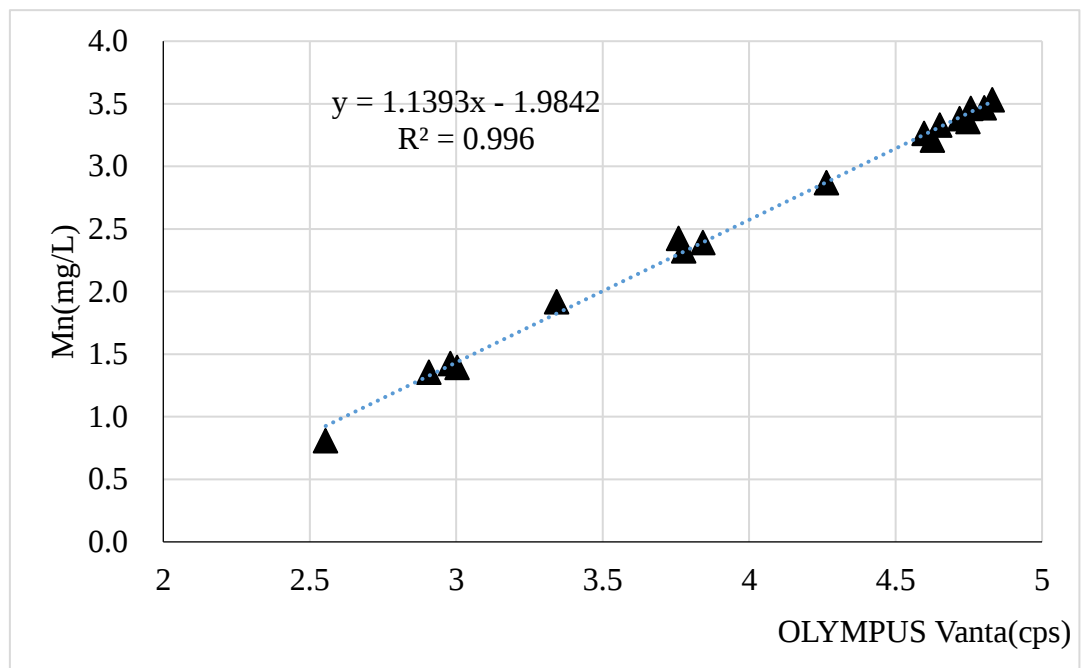


圖 5-29 含錳的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)



結果與討論

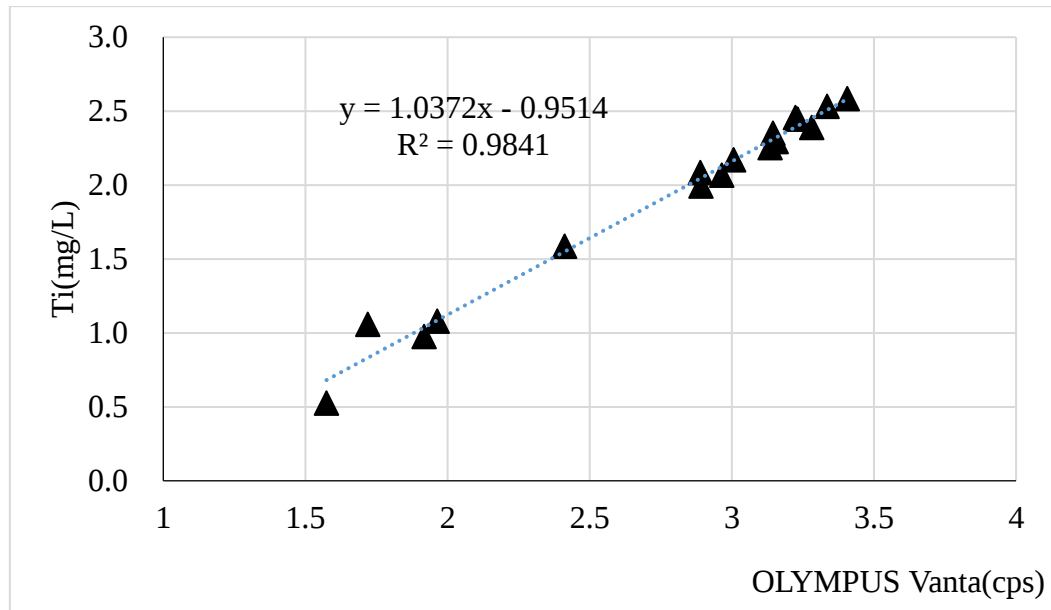


圖 5-30 含鈦的樹脂對應 OLYMPUS Vanta 數據對數關係圖(以 10 為底)



5.3 「智慧污染監測系統裝置」現地試驗

本研究除了進行實驗室交換樹脂的陽離子吸附實驗之外，選定彰化縣東西二、三圳灌排系統區域做為「智慧污染監測系統裝置」現地實驗測試地點。本計畫並於 2023 年 1 月中進行彰化與台中地區進行現勘作業，透過 GPS 手持設備紀錄渠道現況與周圍環境條件，作為後續挑選「智慧污染監測系統裝置」監測位置參考之依據。在完成現勘作業後，本計畫輔以地理資訊系統併搭配交通路線，提昇埋設「智慧污染監測系統裝置」至監測環境的效率。

現地農地試驗驗證初步規畫在彰化或台中水利管理處轄下灌區與其他高污染潛勢區域作為研究區域，內容包含水田背景資料蒐集與選定、監測裝置佈設規劃與設計、監測裝置埋設與回收作業以及樣本前處理與 XRF 檢測作業。首先針對水田背景資料進行蒐集，選定至少 2 個灌溉小組，每個灌溉小組選定至少 2 個農地坵塊進行監測作業，依據農地坵塊的出入水口位置，在每個農地坵塊設置至少 3 個監測點位，每個點位埋設陰、陽離子交換樹脂各 3 個，如圖 4-7 與圖 4-8 所示(實際選定)。本監測裝置埋設時間係在水田整田後，監測期間涵蓋一個期作的水稻栽種期(約 120~150 天)，在監測裝置埋設前後，分別採集對應土壤樣本作為重金屬濃度變化的參考比較依據，農地土壤背景值檢測遵循環檢所土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法—攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法 (NIEA S322.60C)。本計畫農地現地檢測項目包含監測裝置的陰、陽離子交換樹脂以及對應的土壤樣本，合計檢測陰、陽離子交換樹脂的數量為 72 個，土壤 XRF 檢測數量為 12 個，如表 4-3 所示。

本計畫農地試驗選取地號分別為鹿港鎮鹿雅段 221 地號、鹿港鎮鹿雅段 246 地號、和美鎮大雅段 527 地號以及和美鎮大雅段 657 地號等 4 塊，每塊農地選取 3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))，每個監測位置分別各埋設 3 個氫型(陽離子)與氫氧型(陰離子)離子交換樹脂，如表 5-11 所示。鹿港鎮的監測農地(鹿雅段 221 地號與鹿雅段 246 地號)埋設交換樹脂的時間範圍為 3 月 5 日至 6 月 15 日，計 103 天；和美鎮的監測農地(大雅段 527 地號與大雅段 657 地號)埋設交換樹脂的時間範圍為 3 月 6 日至 6 月 16 日，計 103 天。試驗農地監測在空間的相對分佈位置分別如圖 5-31、圖 5-32、圖 5-33 與圖 5-34 所示；每個監測農地所採集土壤的 3 個位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))經由烘乾與過篩後，再以手持式 XRF 檢測之，分別如表 5-12、表 5-13、表 5-14 與表 5-15 所示。



表 5-11 試驗農地監測樹脂種類與地號一覽表

項次	地號	監測時間	監測位置	重複個數	樹脂種類
1	鹿港鎮鹿雅段 0221-0000 地號	03/05~06/15	3(A,B,C)	3	氫型與氫氧型
2	鹿港鎮鹿雅段 0246-0000 地號	03/05~06/15	3(A,B,C)	3	氫型與氫氧型
3	和美鎮大雅段 0527-0000 地號	03/06~06/16	3(A,B,C)	3	氫型與氫氧型
4	和美鎮大雅段 0657-0000 地號	03/06~06/16	3(A,B,C)	3	氫型與氫氧型



圖 5-31 試驗農地鹿港鎮鹿雅段 221 地號監測位置圖

首先，依據所有「智慧污染監測系統裝置」的鈣濃度值最高為 57,631mg/kg，尚未達到飽和狀態(約為 110,000 mg/kg 左右)，確認本計畫的樹脂交換能力(氫型與氫氧型)在 1 個水稻栽種期作中是可以有效運作與監控土壤飽和水中重金屬的狀況。根據 4 塊試驗農地監測陽離子交換樹脂(氫型)中鈣與鋁的濃度得知，本計畫水田土壤飽和水入滲量的訊號(鈣：13,254~57,631 mg/kg；鋁：78~287 mg/kg)比使用鈉型離子交換樹脂的訊號(鈣：12,974~33,657 mg/kg；鋁：78~287 mg/kg)(環保署 109 與 110 年度土壤及地下水污染調查及查證工作計畫-彰化縣)要來得大。由 4 塊試驗農地



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

監測陽離子交換樹脂(氫型)中鈣與鋇的濃度關係得知，兩者線性相關性高 ($R^2=0.8793$)，說明在水田土壤飽和水中鈣與鋇的分佈與在灌溉水的型態有其一致性的趨勢，如圖 5-32 所示。

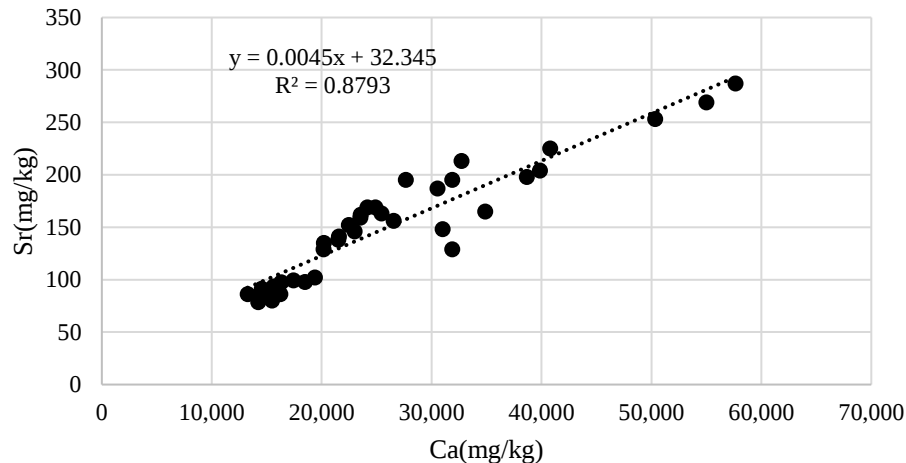


圖 5-32 試驗農地(鹿雅段與大雅段)監測樹脂鈣與鋇濃度關係圖

本計畫在彰化縣鹿港鎮鹿雅段 221 地號採集 3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的 0-15 公分表土進行手持式 XRF 篩測，以重金屬鋅為例，其濃度分別為入水口(A)307 mg/kg、中間點(B)206 mg/kg 以及出水口(C)241 mg/kg，如表 5-12 所示。鹿雅段 221 地號的水田「智慧污染監測系統裝置」所蒐集的資料顯示，3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的各自 3 重複監測數據差異不大，如 A(入水口)的檢測時分別為 18,471 mg/kg、20,184 mg/kg 與 19,365 mg/kg，如表 5-12 所示。但是，A(平均 19,340 mg/kg)、B(22,197 mg/kg)與 C(22,262 mg/kg)的鈣濃度則是出現明顯變化，顯示這塊水田在空間上的入滲量是不均勻的，以中間點(B)與出水口(C)的位置入滲量較大，以該坵塊的鈣濃度平均值為基準 21,266 mg/kg，入水口(A)的入滲量比平均值低約 9.1%，中間點(B)的入滲量比平均值高約 4.4%，出水口(C)的入滲量比平均值高約 4.7%；而鋇濃度的資料亦顯示有相同的變化趨勢。

整體來說，鹿雅段 221 地號水田土壤飽和水中陽離子交換樹脂(氫型)檢測到以鎳、銅與鋅為主，陰離子交換樹脂(氫氧型)則是檢測到鉻，其餘鎘、鉛則是無訊號產生(低於檢測極限)，如表 5-12 所示。顯示在厭氧條件下，鎳、銅與鋅主要還是因帶正電而被陽離子交換樹脂(氫型)吸附，而鉻則是以帶負電的型態被陰離子交換樹脂(氫氧型)吸附，鎘與鉛則是因為土



結果與討論

壤飽和水中的濃度太低無法呈現出來。進一步比對實驗室滲漏試驗中的吸附情況，重金屬鋅與銅在相同滲漏水濃度下，重金屬鋅相對於銅來說較易移動而被陽離子交換樹脂(氫型)所吸附。受限於計畫資源以及時程因素無法進行第2期作監測作業，如能蒐集更多數據，透過累積大量數據後，可進一步作為評估水田受重金屬污染風險的指標。

水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

表 5-12 彰化縣鹿港鎮鹿雅段 221 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表

點位名稱	屬性	位置說明	時間	鈣	鉻	鎳	銅	鋅	鎘	鉛	鋇
0221-AS01	土壤(XRF)	A 入水口	03/05	-	153	137	179	307	<LOD	137	-
0221-AS02	土壤(XRF)	B 中心點	03/05	-	102	92	121	206	<LOD	93	-
0221-AS03	土壤(XRF)	C 出水口	03/05	-	119	104	143	241	<LOD	105	-
HA0221-1	樹脂包(氫型)	A 入水口 1	03/05~06/15	18,471	<LOD	341	92.2	521	<LOD	<LOD	97.8
HA0221-2	樹脂包(氫型)	A 入水口 2	03/05~06/15	20,184	<LOD	287	84.3	603	<LOD	<LOD	135
HA0221-3	樹脂包(氫型)	A 入水口 3	03/05~06/15	19,365	<LOD	302	79.4	574	<LOD	<LOD	102
HB0221-1	樹脂包(氫型)	B 中心點 1	03/05~06/15	21,547	<LOD	298	102.3	621	<LOD	<LOD	141
HB0221-2	樹脂包(氫型)	B 中心點 2	03/05~06/15	23,547	<LOD	314	85.1	643	<LOD	<LOD	162
HB0221-3	樹脂包(氫型)	B 中心點 3	03/05~06/15	21,496	<LOD	221	86.4	674	<LOD	<LOD	138
HC0221-1	樹脂包(氫型)	C 出水口 1	03/05~06/15	20,168	<LOD	187	75.1	583	<LOD	<LOD	129
HC0221-2	樹脂包(氫型)	C 出水口 2	03/05~06/15	24,147	<LOD	201	68.4	602	<LOD	<LOD	169
HC0221-3	樹脂包(氫型)	C 出水口 3	03/05~06/15	22,471	<LOD	274	73.6	547	<LOD	<LOD	152
OHA0221-1	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 1	03/05~06/15	<LOD	6.5	<LOD	6.3	10.3	<LOD	<LOD	<LOD
OHA0221-2	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 2	03/05~06/15	<LOD	8.7	7.3	8.4	14.2	<LOD	<LOD	5.6
OHA0221-3	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 3	03/05~06/15	321	10.2	8.6	6.9	9.5	<LOD	<LOD	<LOD
OHB0221-1	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 1	03/05~06/15	102	8.6	<LOD	8.6	7.8	<LOD	<LOD	8.6
OHB0221-2	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 2	03/05~06/15	55	12.4	5.2	9.0	11.2	<LOD	<LOD	<LOD
OHB0221-3	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 3	03/05~06/15	<LOD	10.7	6.7	9.8	10.4	<LOD	<LOD	5.5
OHC0221-1	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 1	03/05~06/15	<LOD	9.6	<LOD	7.6	9.6	<LOD	<LOD	6.7
OHC0221-2	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 2	03/05~06/15	175	14.1	5.2	8.2	7.8	<LOD	<LOD	4.8
OHC0221-3	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 3	03/05~06/15	98	10.7	8.4	9.1	8.3	<LOD	<LOD	8.2

註：土壤(XRF)係以手持式 OLYMPUS Vanta 分析之檢測值。



圖 5-33 試驗農地鹿港鎮鹿雅段 246 地號監測位置圖

本計畫在彰化縣鹿港鎮鹿雅段 246 地號採集 3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的 0-15 公分表土進行手持式 XRF 篩測，以重金屬鋅為例，其濃度分別為入水口(A)511 mg/kg、中間點(B)425 mg/kg 以及出水口(C)399 mg/kg，如表 5-13 所示。鹿雅段 246 地號的水田「智慧污染監測系統裝置」所蒐集的資料顯示，3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的各自 3 重複監測數據差異不大，如 A(入水口)的檢測時分別為 14,468 mg/kg、16,102 mg/kg 與 15,302 mg/kg，如表 5-13 所示。但是，A(平均 14,468 mg/kg)、B(16,102 mg/kg)與 C(15,302 mg/kg)的鈣濃度則是出現明顯變化，顯示這塊水田在空間上的入滲量是不均勻的，以中間點(B)的位置入滲量較大，以該坵塊的鈣濃度平均值為基準 15,291 mg/kg，入水口(A)的入滲量比平均值低約 5.4%，中間點(B)的入滲量比平均值高約 5.3%，出水口(C)的入滲量與平均值略高約 0.1%；而鋅濃度的資料亦顯示有相同的變化趨勢。

整體來說，鹿雅段 246 地號水田土壤飽和水中陽離子交換樹脂(氫型)檢測到還是以鎳、銅與鋅為主，陰離子交換樹脂(氫氧型)則是檢測到鉻，其餘鎘、鉛則是無訊號產生(低於檢測極限)，如表 5-13 所示。顯示在厭氧條件下，鎳、銅與鋅主要還是因帶正電而被陽離子交換樹脂(氫型)吸附，而鉻則是以帶負電的型態被陰離子交換樹脂(氫氧型)吸附，鎘與鉛則是因為土壤飽和水中的濃度太低無法呈現出來。進一步比對實驗室滲漏試驗中的吸附情況，重金屬鋅與銅在相同滲漏水濃度下，重金屬鋅相對於銅來說較易移動而被陽離子交換樹脂(氫型)所吸附。重金屬銅在該農地坵塊中土壤的濃度偏高為 527 mg/kg(手持式 XRF 篩測)，所以在陽離子交換樹脂(氫型)的吸附濃度亦有較高的現象，顯示埋設土壤中的「智慧污染監測系統



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

裝置」亦會反應土壤金屬濃度的變化趨勢。受限於計畫資源以及時程因素無法進行第2期作監測作業，如能蒐集更多數據，透過累積大量數據後，可進一步作為評估水田受重金屬污染風險的指標。

表 5-13 彰化縣鹿港鎮鹿雅段 246 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表

點位名稱	屬性	位置說明	時間	鈣	鉻	鎳	銅	鋅	鎘	鉛	鋇
0246-AS01	土壤(XRF)	A 入水口	03/05	-	322	195	527	511	<LOD	214	-
0246-AS02	土壤(XRF)	B 中心點	03/05	-	221	128	368	425	<LOD	159	-
0246-AS03	土壤(XRF)	C 出水口	03/05	-	247	147	433	399	<LOD	162	-
HA0246-1	樹脂包(氫型)	A 入水口 1	03/05~06/15	13,254	5.6	373	236	587	<LOD	<LOD	86.3
HA0246-2	樹脂包(氫型)	A 入水口 2	03/05~06/15	14,527	3.2	321	214	541	<LOD	<LOD	91.2
HA0246-3	樹脂包(氫型)	A 入水口 3	03/05~06/15	15,624	<LOD	326	263	596	<LOD	<LOD	93.5
HB0246-1	樹脂包(氫型)	B 中心點 1	03/05~06/15	16,324	2.1	284	159	603	<LOD	<LOD	97.3
HB0246-2	樹脂包(氫型)	B 中心點 2	03/05~06/15	14,571	<LOD	237	152	624	<LOD	<LOD	87.1
HB0246-3	樹脂包(氫型)	B 中心點 3	03/05~06/15	17,412	<LOD	224	141	669	<LOD	<LOD	99.4
HC0246-1	樹脂包(氫型)	C 出水口 1	03/05~06/15	16,219	<LOD	241	168	568	<LOD	<LOD	86.3
HC0246-2	樹脂包(氫型)	C 出水口 2	03/05~06/15	15,471	<LOD	284	171	610	<LOD	<LOD	80.1
HC0246-3	樹脂包(氫型)	C 出水口 3	03/05~06/15	14,217	<LOD	298	184	596	<LOD	<LOD	78.4
OHA0246-1	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 1	03/05~06/15	<LOD	15.2	6.8	45.6	12.1	<LOD	<LOD	2.3
OHA0246-2	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 2	03/05~06/15	<LOD	14.6	10.4	42.8	11.4	<LOD	<LOD	4.6
OHA0246-3	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 3	03/05~06/15	21.3	16.7	6.2	39.4	10.7	<LOD	<LOD	6.1
OHB0246-1	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 1	03/05~06/15	<LOD	15.1	4.6	24.2	6.6	<LOD	<LOD	8.6
OHB0246-2	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 2	03/05~06/15	10.6	13.6	3.2	26.3	8.2	<LOD	<LOD	<LOD
OHB0246-3	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 3	03/05~06/15	<LOD	20.1	2.7	27.9	9.4	<LOD	<LOD	9.8
OHC0246-1	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 1	03/05~06/15	8.6	19.6	4.8	36.4	10.2	<LOD	<LOD	6.7
OHC0246-2	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 2	03/05~06/15	<LOD	24.1	5.9	38.2	9.8	<LOD	<LOD	4.8
OHC0246-3	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 3	03/05~06/15	<LOD	12.1	7.4	34.9	12.3	<LOD	<LOD	3.2

註：土壤(XRF)係以手持式 OLYMPUS Vanta 分析之檢測值。



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發



圖 5-34 試驗農地和美鎮大雅段 527 地號監測位置圖

本計畫在彰化縣和美鎮大雅段 527 地號採集 3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的 0-15 公分表土進行手持式 XRF 篩測，以重金屬鋅為例，其濃度分別為入水口(A)268 mg/kg、中間點(B)137 mg/kg 以及出水口(C)128 mg/kg，如表 5-14 所示。在大雅段 527 地號的水田「智慧污染監測系統裝置」所蒐集的資料顯示，3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的各自 3 重複監測數據差異不大，如 A(入水口)的檢測時分別為 26,539 mg/kg、24,873 mg/kg 與 27,653 mg/kg，如表 5-14 所示。但是，A(平均 26,355 mg/kg)、B(31,705 mg/kg)與 C(23,978 mg/kg)的鈣濃度則是出現明顯變化，顯示這塊水田在空間上的入滲量也是不均勻的，以中間點(B)的位置入滲量最大，以該坵塊的鈣濃度平均值為基準 27,346 mg/kg，入水口(A)的入滲量比平均值低約 3.6%，中間點(B)的入滲量比平均值高約 15.9%，出水口(C)的入滲量比平均值低約 12.3%；而鋅濃度的資料亦顯示有相同的變化趨勢。導致入滲量不平均的原因可能的原因包括耕耘機在整田操作上的技術，引水灌溉時的流量控制等。

整體來說，大雅段 527 地號水田土壤飽和水中陽離子交換樹脂(氫型)檢測到還是以鎳、銅與鋅為主，陰離子交換樹脂(氫氧型)則是檢測到鉻，其餘鎘、鉛則是無訊號產生(低於檢測極限)，如表 5-14 所示。顯示在厭氧條件下，鎳、銅與鋅主要還是因帶正電而被陽離子交換樹脂(氫型)吸附，而鉻則是以帶負電的型態被陰離子交換樹脂(氫氧型)吸附，鎘與鉛則是因為土壤飽和水中的濃度太低無法呈現出來。進一步比對實驗室滲漏試驗中的吸附情況，重金屬鋅與銅在相同滲漏水濃度下，重金屬鋅相對於銅來說較易移動而被陽離子交換樹脂(氫型)所吸附。重金屬銅在該農地坵塊中土



結果與討論

壤的濃度偏低約為 99 mg/kg(手持式 XRF 篩測)，所以在陽離子交換樹脂(氫型)的吸附濃度亦有較低的現象，顯示埋設土壤中的「智慧污染監測系統裝置」亦會反應土壤金屬濃度的變化趨勢。受限於計畫資源以及時程因素無法進行第 2 期作監測作業，如能蒐集更多數據，透過累積大量數據後，可進一步作為評估水田受重金屬污染風險的指標。

水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

表 5-14 彰化縣和美鎮大雅段 527 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表

點位名稱	屬性	位置說明	時間	鈣	鉻	鎳	銅	鋅	鎘	鉛	鋇
0527-AS01	土壤(XRF)	A 入水口	03/06	-	98	125	99	268	<LOD	119	-
0527-AS02	土壤(XRF)	B 中心點	03/06	-	73	98	57	137	<LOD	95	-
0527-AS03	土壤(XRF)	C 出水口	03/06	-	75	104	61	128	<LOD	86	-
HA0527-1	樹脂包(氫型)	A 入水口 1	03/06~06/16	26,539	<LOD	287	78.9	558	<LOD	<LOD	156
HA0527-2	樹脂包(氫型)	A 入水口 2	03/06~06/16	24,873	<LOD	229	73.2	529	<LOD	<LOD	169
HA0527-3	樹脂包(氫型)	A 入水口 3	03/06~06/16	27,653	<LOD	312	68.2	612	<LOD	<LOD	195
HB0527-1	樹脂包(氫型)	B 中心點 1	03/06~06/16	32,719	<LOD	229	81.6	654	<LOD	<LOD	213
HB0527-2	樹脂包(氫型)	B 中心點 2	03/06~06/16	30,521	<LOD	258	75.3	689	<LOD	<LOD	187
HB0527-3	樹脂包(氫型)	B 中心點 3	03/06~06/16	31,876	<LOD	238	72.4	703	<LOD	<LOD	195
HC0527-1	樹脂包(氫型)	C 出水口 1	03/06~06/16	25,439	<LOD	237	68.9	594	<LOD	<LOD	163
HC0527-2	樹脂包(氫型)	C 出水口 2	03/06~06/16	22,975	<LOD	218	65.4	581	<LOD	<LOD	146
HC0527-3	樹脂包(氫型)	C 出水口 3	03/06~06/16	23,519	<LOD	209	57.9	562	<LOD	<LOD	159
OHA0527-1	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 1	03/06~06/16	102	10.3	4.1	4.2	12.4	<LOD	<LOD	<LOD
OHA0527-2	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 2	03/06~06/16	87.6	9.8	3.9	6.9	16.2	<LOD	<LOD	<LOD
OHA0527-3	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 3	03/06~06/16	106	11.8	5.7	5.2	20.2	<LOD	<LOD	<LOD
OHB0527-1	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 1	03/06~06/16	254	12.3	5.9	7.3	12.4	<LOD	<LOD	5.3
OHB0527-2	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 2	03/06~06/16	209	10.9	6.1	8.4	13.2	<LOD	<LOD	7.8
OHB0527-3	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 3	03/06~06/16	186	16.2	<LOD	8.1	15.3	<LOD	<LOD	6.9
OHC0527-1	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 1	03/06~06/16	164	12.3	<LOD	6.3	10.2	<LOD	<LOD	4.2
OHC0527-2	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 2	03/06~06/16	132	10.7	<LOD	5.7	11.3	<LOD	<LOD	3.8
OHC0527-3	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 3	03/06~06/16	112	9.7	3.9	7.2	9.8	<LOD	<LOD	4.9

註：土壤(XRF)係以手持式 OLYMPUS Vanta 分析之檢測值。



圖 5-35 試驗農地和美鎮大雅段 657 地號監測位置圖

本計畫在彰化縣和美鎮大雅段 657 地號採集 3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的 0-15 公分表土進行手持式 XRF 篩測，以重金屬鋅為例，其濃度分別為入水口(A)241 mg/kg、中間點(B)112 mg/kg 以及出水口(C)183 mg/kg，如表 5-15 所示。在大雅段 657 地號的水田「智慧污染監測系統裝置」所蒐集的資料顯示，3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的各自 3 重複監測數據差異不大，如 A(入水口)的檢測時分別為 57,631 mg/kg、50,328 mg/kg 與 54,983 mg/kg，如表 5-15 所示。但是，A(平均 54,314 mg/kg)、B(39,753 mg/kg)與 C(32,577 mg/kg)的鈣濃度則是出現明顯變化，顯示這塊水田在空間上的入滲量也是不均勻的，以入水口(A)的位置入滲量最大，以該坵塊的鈣濃度平均值為基準 42,215 mg/kg，入水口(A)的入滲量比平均值高約 28.7%，中間點(B)的入滲量比平均值低約 5.8%，出水口(C)的入滲量比平均值低於 22.8%；而鋅濃度的資料亦顯示有相同的變化趨勢。導致入滲量不平均的原因可能的原因包括耕耘機在整田操作上的技術，引水灌溉時的流量控制等。值得注意的是，該水田坵塊在 4 個農地坵塊中，入滲量變化差異是最大的，平均入滲量也是最大的。

整體來說，大雅段 657 地號水田土壤飽和水中陽離子交換樹脂(氫型)檢測到還是以鎳、銅與鋅為主，陰離子交換樹脂(氫氧型)則是檢測到鉻，其餘鎘、鉛則是無訊號產生(低於檢測極限)，如表 5-15 所示。顯示在厭氧條件下，鎳、銅與鋅主要還是因帶正電而被陽離子交換樹脂(氫型)吸附，而鉻則是以帶負電的型態被陰離子交換樹脂(氫氧型)吸附，鎘與鉛則是因



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

為土壤飽和水中的濃度太低無法呈現出來。進一步比對實驗室滲漏試驗中的吸附情況，重金屬鋅與銅在相同滲漏水濃度下，重金屬鋅相對於銅來說較易移動而被陽離子交換樹脂(氫型)所吸附。重金屬銅在該農地坵塊中土壤的濃度偏低約為 102 mg/kg(手持式 XRF 篩測)，所以在陽離子交換樹脂(氫型)的吸附濃度亦有較低的現象，顯示埋設土壤中的「智慧污染監測系統裝置」亦會反應土壤金屬濃度的變化趨勢。受限於計畫資源以及時程因素無法進行第2期作監測作業，如能蒐集更多數據，透過累積大量數據後，可進一步作為評估水田受重金屬污染風險的指標。

表 5-15 彰化縣和美鎮大雅段 657 地號離子交換樹脂手持式 XRF 篩測數據一覽表

點位名稱	屬性	位置說明	時間	鈣	鉻	鎳	銅	鋅	鎘	鉛	鋇
0657-AS01	土壤(XRF)	A 入水口		-	121	128	102	241	<LOD	209	-
0657-AS02	土壤(XRF)	B 中心點	03/06	-	108	73	57	112	<LOD	87	-
0657-AS03	土壤(XRF)	C 出水口	03/06	-	98	107	87	183	<LOD	129	-
HA0657-1	樹脂包(氫型)	A 入水口 1	03/06~06/16	57,631	<LOD	473	193.4	389	<LOD	<LOD	287
HA0657-2	樹脂包(氫型)	A 入水口 2	03/06~06/16	50,328	<LOD	397	176.3	426	<LOD	<LOD	253
HA0657-3	樹脂包(氫型)	A 入水口 3	03/06~06/16	54,983	<LOD	432	164.9	452	<LOD	<LOD	269
HB0657-1	樹脂包(氫型)	B 中心點 1	03/06~06/16	39,842	<LOD	248	103.9	275	<LOD	<LOD	204
HB0657-2	樹脂包(氫型)	B 中心點 2	03/06~06/16	38,652	<LOD	252	99.4	287	<LOD	<LOD	198
HB0657-3	樹脂包(氫型)	B 中心點 3	03/06~06/16	40,764	<LOD	237	87.4	265	<LOD	<LOD	225
HC0657-1	樹脂包(氫型)	C 出水口 1	03/06~06/16	34,871	<LOD	396	123.9	387	<LOD	<LOD	165
HC0657-2	樹脂包(氫型)	C 出水口 2	03/06~06/16	30,987	<LOD	375	138.9	392	<LOD	<LOD	148
HC0657-3	樹脂包(氫型)	C 出水口 3	03/06~06/16	31,873	<LOD	348	143.2	354	<LOD	<LOD	129
OHA0657-1	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 1	03/06~06/16	437	17.9	11.2	16.8	20.4	<LOD	<LOD	16.5
OHA0657-2	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 2	03/06~06/16	529	18.6	13.2	18.2	24.2	<LOD	<LOD	15.5
OHA0657-3	樹脂包(氫氧型)	A 入水口 3	03/06~06/16	483	20.1	18.6	17.9	21.1	<LOD	<LOD	13.2
OHB0657-1	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 1	03/06~06/16	365	15.8	8.4	8.2	12.3	<LOD	<LOD	10.6
OHB0657-2	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 2	03/06~06/16	298	16.2	6.9	7.6	15.2	<LOD	<LOD	11.2
OHB0657-3	樹脂包(氫氧型)	B 中心點 3	03/06~06/16	302	17.3	7.2	6.3	10.2	<LOD	<LOD	9.8
OHC0657-1	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 1	03/06~06/16	274	13.2	9.3	10.3	13.5	<LOD	<LOD	8.2
OHC0657-2	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 2	03/06~06/16	251	15.1	8.9	9.8	14.2	<LOD	<LOD	7.4
OHC0657-3	樹脂包(氫氧型)	C 出水口 3	03/06~06/16	298	11.2	10.2	13.2	15.5	<LOD	<LOD	6.1

註：土壤(XRF)係以手持式 OLYMPUS Vanta 分析之檢測值。



5.4 專家諮詢會議

專家諮詢會議已於民國 112 年 07 月 14 日下午 3 點以網路視訊會議 (CISCO 視訊會議軟體) 的型式舉辦，會議連結網址相關資料為 <https://ntumeet.webex.com/ntumeet/j.php?MTID=mfc55993fddfec0548b82ae7f2be206sc>，由國立臺灣大學水工試驗所林聖淇博士擔任會議主持人，邀請與會專家學者有國立臺灣大學生工系蕭友晉教授，國立屏東科技大學土木系邱登保兼任助理教授以及農田水利署嘉南管理處佳里分處管理師兼主任謝勝賢博士。出席者還包括本計畫參與執行的台大農化系兼任助理莊繹叡碩士以及國立台藝大莊子醇學士。會議資料說明與簡報資料如附件 1 所示，會中主要針對「智慧污染監測系統裝置」應用於水田重金屬污染預警系統之可行性與注意事項等進行討論與意見交流，如圖 5-36 所示。

國立臺灣大學生工系蕭友晉教授於會中強調水田田間管理方式因人而異，建議應先針對特定重金屬污染潛勢區域進行長時間監測，累積足夠數據才能了解趨勢變化，同時應積極與農民討論灌溉水現況，達到事半功倍的效果。再者，灌溉渠道污染來源複雜，為更能釐清污染來源，建議應針對受污染潛勢區域周圍環境的工廠建立相對應的資料庫，透過科技監控整合技術(地理資訊系統 GIS)提升預警系統的效率。

屏科大土木系邱登保兼任助理教授認為「智慧污染監測系統裝置」技術成果應朝向實務操作簡易方向進行，農地監測可以以入滲量大的監測位置為主，例如一塊農田的入水口處作為監測點位即可。如果可以大面積使用，所蒐集到的資料會是很好的議題與研究方向，建議持續投入相關資源作為未來政策的論證基礎。他也建議實驗室砂質土壤的滲漏實驗得知不同重金屬在淋洗的過程中會呈現不同程度的吸附結果，建議後續可以針對不同土壤質地進行進一步的分析與探討。藉以提供更多基礎資料，來驗證離子交換樹脂在厭氧條件下對重金屬的吸附效率。

農田水利署嘉南管理處佳里分處管理師兼主任謝勝賢博士則是建議灌溉水渠道上亦可以適度放置之前團隊研發的縮時樹脂膠囊，除了考慮水量與水質的問題之外，民配合意願會是關鍵，可以適度與水利會業務單位討論，提升預警系統的可靠性。同時，把「智慧污染監測系統裝置」的實務操作面修正成可以由農民協助執行，後端檢測作業再由研究團隊接手，應該可以建立有效農地受重金屬污染的預警機制。



結果與討論

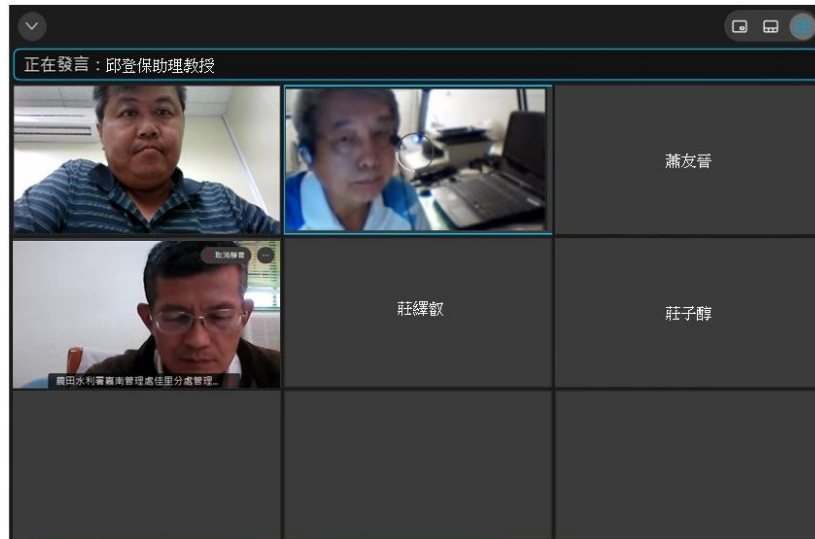


圖 5-36 「智慧污染監測系統裝置」專家諮詢會議



5.5 水田重金屬污染預警系統標準作業程序

本計畫完成「智慧污染監測系統裝置」之研發設計，將水田重金屬污染預警系統標準作業程序如圖 5-37 所示。現地試驗係利用樹脂離子交換為基材做成離子交換樹脂圓盤採樣器，將其埋設於監測之點，一段時間(稻作生長期)後收回監測採樣器利用手持式 X-射線螢光光譜儀快速分析測定重金屬的元素含量分布特性，所吸附之重金屬可做為判定水田在栽種水稻期間，灌溉水是否含有其他重金屬污染來源的證據之一。在其標準作業程序中，因耕種農民對「智慧重金屬污染監測裝置」的埋設在田間管理上會產生困擾，因此該採樣器埋設時間建議選在農民插秧完成後再進行埋設作業。建議先以灌溉小組為單元，作為預警的範圍，待蒐集 3-5 年後(1 年 2 期作)，累積足夠數據資料即可作為評估該區域受重金屬污染的風險，如發現監測數據有明顯增加或異常的現象，可輔以灌溉渠道離子縮時樹脂膠囊進一步擴大監控灌溉水質，避免受污染的灌溉水進入水田。

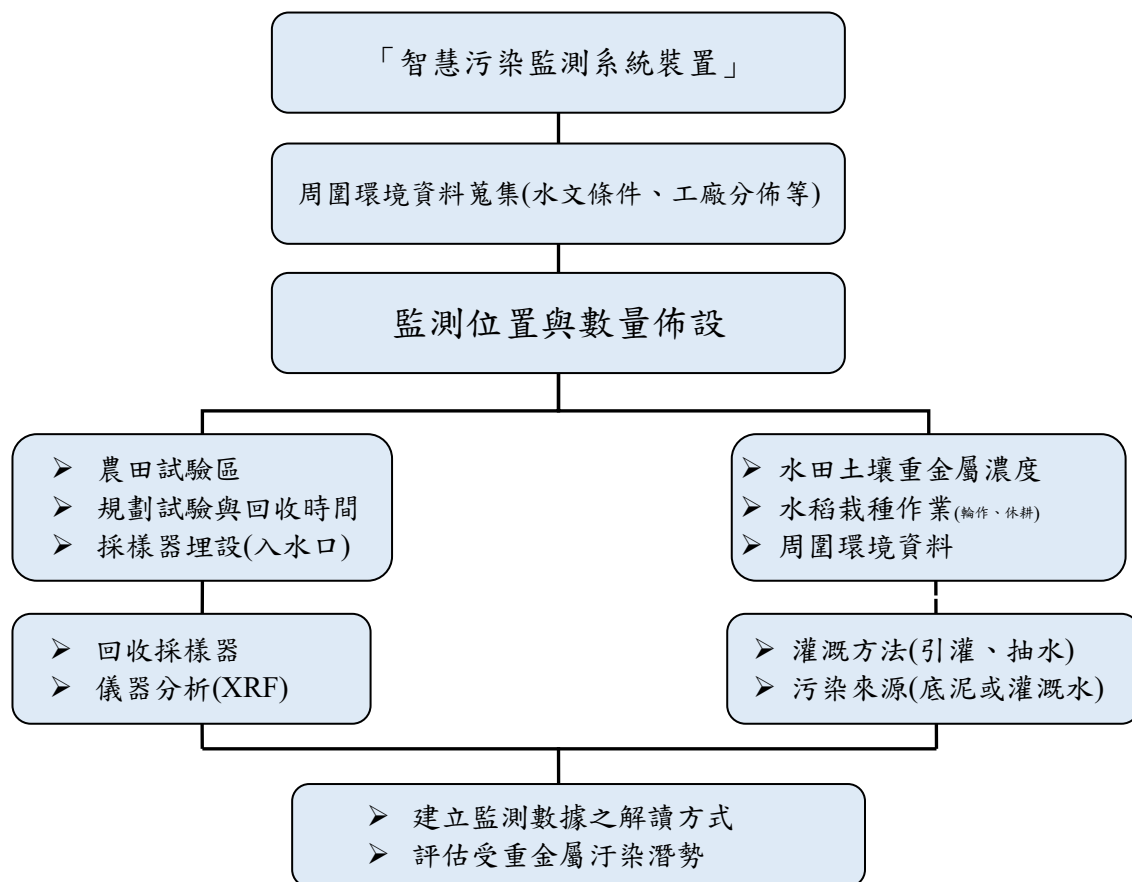


圖 5-37 水田重金屬污染預警系統標準作業程序流程圖



結果與討論

本計畫文獻回顧中提及的 Sorbisense 技術雖具有成本效益的被動採樣方法，可替代傳統抓樣的補充或潛在方法，其原理可精確地測量樣品體積和溶質質量濃度，且容易取出藥筒，並送至實驗室進行分析，然其設備缺點是收集樣本時間過短，受限示踪劑的容量。本計畫研發之「智慧污染監測系統裝置」則具有監控時間長、現場即時檢測、低分析成本以及 17 種重金屬種類檢控等優勢，深具市場競爭性。

表 5-16 「智慧污染監測系統裝置」與 Sorbisense 技術比較一覽表

技術名稱 技術方法與內容	智慧污染監測系統裝置	Sorbisense 技術
區域監控時間	120 天	3-7 天
檢測難度與方法	低(可現場分析)	中(須送回實驗室)
檢測成本	低($\leq$ NT\$1,000 元/次)	中($\leq$ NT\$3,000 元/次)
檢測技術要求	輻射操作人員證照	實驗室專業分析技術
重金屬種類	多(17 種)	中(10 種)
靈敏度	高(強酸型交換樹脂)	中(弱酸型交換樹脂)
重金屬濃度定量	低	高



5.6 結果與討論

1. 本研究計畫以離子交換樹脂為基材已研發出「智慧污染監測系統裝置」，利用樹脂離子交換水中重金屬之快速及強大能力，將該採樣器埋設於定點即可紀錄自埋設監測至回收這段時間內水田入滲之重金屬通量變化。
2. 在實驗室樹脂滲漏計吸附重金屬實驗中，根據數據分析結果說明如下：
 - (1) 重金屬鎘跟鎳在低濃度滲漏試驗中的樹脂吸附濃度部分低於手持式 XRF 的偵測極限，而重金屬鉛雖然能檢測出濃度值，但是數據偏低。隨著滲漏水體的濃度增加，發生在滲漏水金屬因濃度過低導致鎘跟鎳金屬容易被土壤顆粒吸附，產生檢測數據偏低的現象持續獲得改善。
 - (2) 實驗室高濃度金屬滲漏試驗中，由金屬檢測數據資料中顯示，透過統計的相關係數分析得知，11 種金屬的濃度相關係數皆達 0.95 以上，說明選用適合的離子交換樹脂(氫型)可以有效地得知滲漏水中水體通量變化趨勢的影響。
 - (3) 分析鈣與鋁、銅與鋁、鋅與鋁以及鉻與鋁的濃度線性關係中，隨著滲漏水體的濃度增加，發現鈣與鋁以及銅與鋁的濃度線性關係較不受低滲漏量的影響；其餘二種本研究案關心的重金屬(鋅與鉻)因低滲漏量(例如 4 L 滲漏量)，使得線性截距值偏大而無法通過原點的現象發生。
 - (4) 實驗室金屬滲漏試驗中，銅與鋁在相同滲漏量的條件下(以 8 L 滲漏量為例)，不同濃度(0.045 mg/L、0.091 mg/L、0.182 mg/L 與 0.727 mg/L)所對應的線性關係高(達 $R^2=0.9966$)，說明氫型離子交換樹脂可以有效地得知滲漏水中金屬濃度變化的趨勢。
3. 依據實驗室樹脂吸附重金屬過程所需得時間顯示，「智慧污染監測系統裝置」在埋設於滲漏計之土壤環境中接觸到含重金屬的水溶液時，只要包覆交換樹脂的不織布或網狀聚酯纖維能夠維持水分子能自由進出監測包不受阻隔，即便接觸時間短暫，該採樣器一樣能夠紀錄土壤水體環境中重金屬的變化趨勢。
4. 填充交換樹脂的裝置選用需有良好通透性(利於重金屬陽離子交換進行)以及材質本身不能含有重金屬(避免影響實驗結果)之要求，選用食用級之耐酸鹼 PVC 材質等級做為扁形圓盤採樣器之外觀設計。如



結果與討論

土壤飽和滲透係數為 10^{-5} (公尺/日) 截面積為 5 平方公分，可計算出一期水稻的入滲通量，另外估算一期作水稻田的入滲水量是 1.2 公尺的深度，監測期間的離子濃縮至 1-2 公分的樹脂厚度，預估可將受監測重金屬污染濃度放大至少 120 倍以上。

5. 水田「智慧污染監測系統裝置」所蒐集的資料顯示，3 個監測位置(A(入水口)、B(中心點)與 C(出水口))的各自 3 重複監測數據差異不大。但是，入水口(A)、中間點(B)與出水口(C)的鈣濃度則是出現明顯差異，顯示水田坵塊在空間上的入滲量也是不均勻的，大部分以入水口(A)與中間點(B)的位置入滲量最大。導致入滲量不平均的原因可能的原因包括耕耘機在整田操作上的技術，引水灌溉時的流量控制等。值得注意的是，本計畫所監測的 4 個農地坵塊中，平均入滲量變化差異可以達到 1 倍以上(鹿港鎮鹿雅段 246 地號鈣的平均濃度為 15,291 mg/kg 與和美鎮大雅段 657 地號鈣的平均濃度為 42,215 mg/kg)。
6. 水田土壤飽和水中陽離子交換樹脂(氫型)的吸附主要是以鎳、銅與鋅為主，陰離子交換樹脂(氫氧型)則是發現有鉻的蹤跡，其餘鎘、鉛則是無訊號產生(低於檢測極限)。顯示在水田厭氧條件下，鎳、銅與鋅主要還是因帶正電而被陽離子交換樹脂(氫型)吸附，而鉻則是以帶負電的型態被陰離子交換樹脂(氫氧型)吸附，鎘與鉛則是因為土壤飽和水中的濃度太低無法呈現出來。
7. 「智慧污染監測系統裝置」的優點是監測成本低廉、效率高與分析快速，再者其紀錄土壤滲漏水含金屬污染的敏感度(重金屬濃度)與位置(固定地點)遠高於對水樣與土壤採樣所能反應的現況，用以評估水田栽種期間受到重金屬隨灌溉水進入農地的風險，作為預防農地受重金屬污染的預警機制，將來推廣至有重金屬污染潛勢的區域，作為保護農地生產安全的方法。



5.7 建議事項

1. 「智慧污染監測系統裝置」技術成果朝向實務操作簡易方向進行，農地監測以入滲量大的監測位置為主，例如一塊農田的入水口處作為監測點位即可。在大面積佈點使用後所蒐集到的資料會是很好的議題與研究，建議持續投入相關資源作為未來政策的論證基礎。
2. 「智慧污染監測系統裝置」的實務操作面經農民協助執行(入水口處的放樣與收樣)，後端檢測作業由研究團隊接手，可以建立有效農地受重金屬污染的預警機制。



六、參考文獻

1. 王玉芬和胡筱敏(2006)，黃河萬家寨斷面水質安全分析，中國安全科學學報，第16卷第1期，第5-9頁。
2. 朱海鵬、章莉菁、吳文娟(1992)，台灣地區土壤重金屬含量現況之分析及探討，第三屆土壤污染防治研討會論文集，第 1-14 頁。
3. 行政院環境保護署(2014)，民國 102 年環境水質監測年報。
4. 行政院環境保護署 (2007) ， 河 川 污 染 統 計 (<http://edw.epa.gov.tw/topicWater.aspx>)，環境品質資料倉儲系統。
5. 行政院環境保護署(1990)，台灣地區土壤重金屬含量調查總報告。
6. 李俊奎(2006)，螯合交換樹脂處理含銅(II)與鎳(II)工業廢水，私立元智大學化學工程與材料科學研究所碩士論文。
7. 林惠嬌(2003)，河川指標污染物及水體分類水質標準之探討，國立台灣大學公共衛生學院環境衛生研究所碩士論文。
8. 徐玉標、張文亮、劉玉雪、李寶鐘、吳波霖(1993)，本省嚴重污染灌溉區土壤作物與地下水之惡化調查—彰化水利會東西二渠灌區，農委會水污染試驗研究報告系列 1，農業工程研究中心。
9. 莊家維(2007)，後勁溪污染潛勢與流域水質調查評估研究，國立高雄海洋科技大學海洋環境工程研究所碩士論文。
10. 張尊國(2010)，彰化農地污染之環境資料蒐集與污染關聯性分析計畫，行政院環境保護署。
11. 張珮錡(2001)，改善灌溉水質受污染之措施研究，私立中原大學土木工程學研究所碩士論文。
12. 凌永健(2011)，被動式滲透膜應用於環境水質中重金屬採樣檢測之研究 (3/3) 成果報告，行政院環境保護署委託研究，計畫編號：EPA-100-E3S3-02-01。



參考文獻

13. 凌永健(2010)，被動式半透膜應用於環境採樣檢測之研究(2/3)成果報告，行政院環境保護署委託研究，EPA-99-E3S2-02-02。
14. 凌永健(2009)，被動式半透膜應用於環境採樣檢測之研究(1/3)成果報告，行政院環境保護署委託研究，EPA-98-E3S4-02-01。
15. 葉正華(1988)，吸附分離過程基礎，北京:化學工業出版社，第 1-16 頁。
16. 黃信慈(2008)，灰色多目標規劃應用在河川水污染防治策略之研究，私立逢甲大學環境工程與科學研究所碩士論文。
17. 劉淑惠(2009)，設置高雄生態水系廊道策略研究，高雄市政府研究發展考核委員會委託研究。
18. 劉黔蘭(1998)，電鍍廢水汙染土壤，土壤與環境，第 1 卷第 2 期，第 161-169 頁。
19. 簡傳彬(2011)，農業回歸水暨餘水再利用可行性研究—以彰化地區為例，行政院經濟建設委員會，委託研究計畫案號：99060403。
20. 謝炳輝、楊定恭、吳國榮(1999)，台灣地區河川水質監測整合方向，第六屆海峽兩岸環境保護研討會論文集，第 84-89 頁。
21. 蘇水龍(2012)，河川復育之生物評估—以二仁溪污染整治計畫為例，長榮大學健康科學學院職業安全與衛生學研究所碩士論文。
22. 謝心色(2011)，灌排系統污染管制策略之成本效益分析—以彰化縣東西二圳重金屬污染管制為例，國立中興大學環境工程學研究所碩士論文。
23. Adam C. Taylor, Gary R Fones, Branislav Vrana, Graham A Mills. (2019) Applications for Passive Sampling of Hydrophobic Organic Contaminants in Water—A Review. Critical Reviews in Analytical Chemistry, <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1675043>.
24. Ansari, R., & Fahim, N. K. (2007). Application of polypyrrole coated on wood sawdust for removal of Cr(VI) ion from aqueous solutions. Reactive and Functional Polymers, 67, 367-374.



水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發

25. Alloway, B. J. (1990) Heavy metals in soils. John Wiley & Sons, Inc. New York.
26. Donia, A. M., Atia, A. A., El-Boraey, H., & Mabrouk, A. D. H. (2006). Uptake studies of copper(II) on glycidyl methacrylate chelating resin containing Fe_2O_3 particles. Separation and Purification Technology, 49, 64-70.
27. Eom T.H., Lee C.H., Kim J.H. and Lee C.H. (2005). Development of an ion exchange system for plating wastewater treatment. Desalination, 180, 163-172.
28. Gode, F., Pehlivan, E., 2006. Removal of chromium (III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: the effect of pH, time, metal concentration and temperature. J. Hazard. Mater. 136, 330-337.
29. Hongwu Tian, Leizi Jiao and Daming Dong. (2019) Rapid Determination of Trace Cadmium in Drinking Water Using laser-induced Breakdown Spectroscopy Coupled with Chelating Resin Enrichment. Scientific Reports, 9, Article number: 10443.
30. Jesper Knutsson, Sebastien Rauch and Gregory M. Morrison. (2013) Performance of a passive sampler for the determination of time averaged concentrations of nitrate and phosphate in water. The Royal Society of Chemistry (Environmental Science: Processes & Impacts), Issue 5, <https://doi.org/10.1039/C3EM00038A>.
31. Juang, R. S.; Wang Y. C. (2003) Ligand-enhanced separation of divalent heavy metals from aqueous solutions using a strong-acid ion-exchange resin. Ind. Eng. Chem. Res., 42, 1948-1954.
32. Jyh-Jaan Steven Huang, Sheng-Chi Lin, Ludvig Löwemark, Sofia Ya Hsuan Liou, Queenie Chang, Tsun-Kuo Chang, Kuo-Yen Wei & Ian W. Croudace, (2019) Rapid assessment of heavy metal pollution using ion-exchange resin sachets and micro-XRF corescanning. Scientific Reports, 9, Article number: 6601.
33. Kang, S. Y.; Lee, J. U.; Moon, S. H.; Kim, K. W. (2004). Competitive adsorption characteristic of Co^{2+} , Ni^{2+} and Cr^{3+} by IRN77 cation exchange resin in synthesized wastewater. Chemosphere, 56, 141-147.
34. Liang F.B., Song Y.L., Huang C.P., Li Y.X. and Chen B.H. (2013). Synthesis of



- novel lignin-based ion-exchange resin and its utilization in heavy metals removal. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52, 1267–1274.
35. Manuel, C., Jolanta W., Antonio de L. and Juan F. R. (2008). Ion-exchange equilibria of Pb^{2+} , Ni^{2+} , and Cr^{3+} ions for H^+ on amberlite IR-120 resin. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 1325–1331.
36. Willie JGM Peijnenburg, Peter R Teasdale, Danny Reible, Julie Mondon, William W Bennett, and Peter GC Campbell, (2013) Passive Sampling Methods for Contaminated Sediments: State of the Science for Metals. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 10(2):179-196.
37. Yanying Li, Chang-Er L. Chen, Wei Chen, Jingwen Chen, Xiyun Cai, Kevin C. Jones, and Hao Zhang, (2019) Development of a Passive Sampling Technique for Measuring Pesticides in Waters and Soils. *Agricultural and Food Chemistry*, 67(22):6397-6406.



111 年度環保署「水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發」

「智慧污染監測系統裝置」專家諮詢會議會議紀錄

壹、會議時間：112 年 07 月 14 日(星期一)下午 15:00~16:00

貳、會議地點：網路視訊會議(CISCO 視訊會議軟體)

參、會議鏈結：<https://ntumeet.webex.com/ntumeet/j.php?MTID=mfc55993fddfec0548b82ae7f2be206sc>

肆、主持人：林聖淇博士

伍、列席人員：國立臺灣大學生工系蕭友晉教授、國立臺灣大學水工試驗所林聖淇博士、國立屏東科技大學土木系邱登保兼任助理教授、農田水利署嘉南管理處佳里分處管理師兼主任謝勝賢博士、台大農化系兼任助理莊繹叡碩士、國立台藝大莊子醇學士。

陸、報告事項：

- 一、台大水工所林聖淇助理研究員簡報 111 年度「水田土壤飽和入滲重金屬通量監測裝置之研發」背景、計畫目標與工作內容說明。
- 二、議題一討論：「智慧污染監測系統裝置」應用於水田重金屬污染預警系統之可行性與注意事項，提請討論。

柒、會議記錄：

(依發言順序)

一、臺大生工系蕭友晉教授

- (一)「智慧污染監測系統裝置」的成果符合計畫目標，水田田間管理方式因人而異，建議應先針對特定重金屬污染潛勢區域進行長時間監測，累積足夠數據才能了解趨勢變化，同時應積極與農民討論灌溉水現況，達到事半功倍的效果。
- (二)灌溉渠道污染來源複雜，為更能釐清污染來源，建議應針對受污染潛勢區域周圍環境的工廠建立相對應的資料庫，透過科技監控整合技術(地理資訊系統 GIS)提升預警系統的效率。

二、屏科大土木系邱登保兼任助理教授

- (一)「智慧污染監測系統裝置」技術成果應朝向實務操作簡易方向進行，農地監測可以以入滲量大的監測位置為主，例如一塊農田的入水口處作為監測點位即可。如果可以大面積使用，所蒐集到的資料會是很好的議題與研究方向，建議持續投入相關資源作為未來政策的論證基礎。
- (二)實驗室砂質土壤的滲漏實驗得知不同重金屬在淋洗的過程中會呈現不同程度的吸附結果，建議後續可以針對不同土壤質地進行進一步的分析與探討。藉以提供更多基礎資料，來驗證離子交換樹脂在厭氧條件下對重金屬的吸附效率。

三、農田水利署嘉南管理處佳里分處管理師兼主任謝勝賢博士

- (一)灌溉水渠道上亦可以適度放置之前團隊研發的縮時樹脂膠囊，除了考慮水量與水質的問題之外，民配合意願會是關鍵，可以適度與水利會業務單位討論，提升預



警系統的可靠性。

- (二)「智慧污染監測系統裝置」的實務操作面可以由農民協助執行，後端檢測作業再由研究團隊接手，應該可以建立有效農地受重金屬污染的預警機制。

網路視訊出席會議畫面截圖

